



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**ROZŠÍŘENÉ VYUŽITÍ BATÉRIOVÝCH SYSTÉMŮ  
V PRŮMYSLOVÝCH OBJEKTECH**

ADVANCED USE OF BATTERY STORAGE SYSTEM IN INDUSTRY

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Patrik Pinkoš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Jiří Pitron**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Elektroenergetika**  
Ústav elektroenergetiky

**Student:** Bc. Patrik Pinkoš  
**Ročník:** 2

**ID:** 164362  
**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## Rozšířené využití bateriových systémů v průmyslových objektech

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Rešerše bateriových technologií a jejich technických parametrů
2. Rozšířené způsoby využití bateriových systémů v jednotlivých aplikacích
3. Tvorba simulačního modelu pro návrh bateriového systému pro konkrétní objekt
4. Validace simulačního modelu na reálné aplikaci s návrhem řídicí logiky

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

Literatura je stanovena dle pokynů vedoucího práce.

**Termín zadání:** 5. 2. 2018

**Termín odevzdání:** 21. 5. 2018

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří Pitron



**doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.**  
předseda oborové rady

### UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

**Bibliografická citácia práce:**

PINKOŠ, P. *Rozšířené využití bateriových systémů v průmyslových objektech*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 105 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Pitron.

„Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Rozšířené využití bateriových systémů v průmyslových objektech jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.“

Ďalej chcem poďakovať za užitočné informácie a rady svojmu vedúcemu práce, ktorým je Ing. Jiří Pitron.

V Brně dne: 1.5.2018

.....

## **ABSTRAKT**

Diplomová práca sa vo svojej teoretickej časti venuje popisu možností akumulácie elektrickej energie so zameraním na elektrochemické akumulátory. Ďalšia kapitola taktiež teoretickej časti práce popisuje možné aplikácie batériového úložiska so zameraním na koncového zákazníka. Diplomová práca sa vo svojej praktickej časti venuje návrhu simulačného modelu pre batériovú aplikáciu peak-shaving, ktoré výstupom sú dve prípadové štúdie vytvorené na základe reálnych dát o spotrebe objektu. V ďalšom bode praktickej časti sa táto práca venuje návrhu riadiacej logiky pre aplikáciu peak-shaving, na základe ktorej je následne verifikovaný navrhnutý simulačný model.

## **KEÚČOVÉ SLOVA:**

batériové úložisko, peak-shaving, batériový systém, rezervovaná kapacita, štvrt' hodinové maximum, Matlab

## **ABSTRACT**

The Diploma thesis in theoretical part deals with description of possibilities of accumulations of electricity energy focusing on electrochemical accumulators. Next chapter of theory also describes possible applications of battery storages focusing on costumer. In practical part diploma thesis deals with suggestion of simulation model for battery application peak-shaving. Output of the suggestion represents two case studies based on real data of commercial building consumption. Furthermore, practical part also deals with suggestion of control logic for application peak-shaving which was used for verification of simulation model.

## **KEY WORDS:**

battery storage, peak shaving, energy storage, reserved capacity, 15min.  
maximum demand, Matlab

## OBSAH

<b>ZOZNAM OBRÁZKOV.....</b>	<b>7</b>
<b>ZOZNAM TABULIEK.....</b>	<b>9</b>
<b>ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>12</b>
<b>2 MOŽNOSTI AKUMULÁCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE.....</b>	<b>13</b>
2.1 MECHANICKÁ AKUMULÁCIA ENERGIE .....	13
2.2 AKUMULÁCIA VO FORME TEPLA.....	13
2.3 AKUMULÁCIA ELEKTROMAGNETICKÝMI DEJMI .....	13
2.4 ELEKTROCHEMICKÁ AKUMULÁCIA.....	13
2.5 VÝSLEDNÉ ZHRNUTIE MOŽNOSTÍ AKUMULÁCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE.....	14
<b>3 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY .....</b>	<b>16</b>
3.1 OLOVENÉ AKUMULÁTORY.....	16
3.2 NIKEL-KADMIOVÉ AKUMULÁTORY .....	16
3.3 SODÍKOVÝ-SÍROVÝ AKUMULÁTORY .....	17
3.4 SODÍK-NIKEL-CHLORIDOVÝ AKUMULÁTORY.....	17
3.5 LÍTIOVÉ AKUMULÁTORY .....	18
3.5.1 HISTÓRIA LÍTIOVÝCH AKUMULÁTOROV .....	18
3.5.2 PRIMÁRNY LÍTIOVÝ ČLÁNOK .....	18
3.5.3 SEKUNDÁRNY LÍTIOVÝ ČLÁNOK.....	18
3.6 PRIETOKOVÉ AKUMULÁTORY .....	24
<b>4 APLIKÁCIE PRE VYUŽITIE BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA .....</b>	<b>27</b>
4.1 PRESUN SPOTREBY V ČASE (PEAK SHIFTING).....	28
4.2 VYKRÝVANIE VÝKONOVÝCH ŠPIČIEK (PEAK SHAVING) .....	29
4.3 REGULÁCIA FREKVENCIE.....	31
4.4 UMELÁ ZÁLOHA .....	32
4.5 VYHLADENIE VÝROBY ZDROJA S KOLÍSAVÝM VÝKONOM .....	32
4.6 UPS – ZÁLOŽNÝ ZDROJ .....	33
<b>5 MODEL BATÉRIOVEJ APLIKÁCIE PEAK-SHAVING .....</b>	<b>38</b>
5.1 POPIS SIMULAČNÉHO MODELU .....	38
5.1.1 VSTUPY PRE VÝPOČET .....	38
5.1.2 VÝPOČET.....	47
5.2 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA – APLIKÁCIA PEAK-SHAVING PRE REÁLNY OBJEKT .....	59
5.2.1 CHARAKTERISTIKA OBJEKTU A VSTUPNÉ INFORMÁCIE .....	59
5.2.2 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA – A.....	61
5.2.3 PRÍPADOVÁ ŠTÚDIA – B .....	68
<b>6 VALIDÁCIA SIMULAČNÉHO MODELU S NÁVRHOM RIADIACEJ LOGIKY .....</b>	<b>75</b>
6.1 NÁVRH RIADIACEJ LOGIKY PRE BATÉRIOVÚ APLIKÁCIU PEAK-SHAVING .....	75
6.1.1 REGULAČNÉ CHARAKTERISTIKY.....	75

---

6.1.2 NÁVRH ZAPOJENIA PRE REGULAČNÝ SYSTÉM ŠTVRŤHODINOVÝCH MAXÍM.....	77
<b>6.2 ANALYZOVANÉ DÁTA.....</b>	<b>78</b>
<b>6.3 VALIDÁCIA SIMULAČNÉHO MODELU NA ZÁKLADE NÁVRHU RIADIACEJ LOGIKY .....</b>	<b>80</b>
<b>7 ZÁVER.....</b>	<b>86</b>
<b>POUŽITÁ LITERATÚRA .....</b>	<b>88</b>
<b>PRÍLOHA – A – SIMULAČNÝ MODEL MATLAB .....</b>	<b>91</b>

## ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1-1 Predikcia vývoja cien Li-ion batérií do roku 2030 [5].....</i>	<i>12</i>
<i>Obr. 2-1 Celková svetová prevádzková kapacita jednotlivých technologických skupín, 2017-upravené autorom [5] .....</i>	<i>14</i>
<i>Obr. 2-2 Rozdelenie kapacity akumulácie tepelnej, elektrochemickej a elektromechanickej po jednotlivých technológiách (2Q/2017), upravené autorom [6].....</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 3-1 Principiálna schéma lítiového článku s katódou na báze oxidu kovového lítia a uhlíkovej anódy, upravené autorom [5].....</i>	<i>19</i>
<i>Obr. 3-2 Diagram základných vlastností LCO batérií.....</i>	<i>20</i>
<i>Obr. 3-3 Diagram základných vlastností LMO batérií .....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-4 Diagram základných vlastností NMC batérií.....</i>	<i>21</i>
<i>Obr. 3-5 Diagram základných vlastností NCA batérií.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-6 Diagram základných vlastností LFP batérií.....</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 3-7 Diagram základných vlastností LTO batérií .....</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 3-8 Porovnanie energetickej hustoty akumulátorov na báze olova, niklu a lítia – upravené autorom [18] .....</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 4-1 Potenciálne lokácie a aplikácie batériových úložísk v ES. [24].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 4-2 Rozdelenie možnosti využitia batériových úložísk v rámci ES-ČR. [28].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-3 Aplikácia presunu spotreby v čase – upravené autorom. [24].....</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 4-4 Meraný diagram spotreby el. energie s/bez uplatnenia Peak-Shavingu [25]. .....</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 4-5 Základný princíp funkcie Peak-Shavingu. [25].....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-6 Aplikácia Peak-Shavingu – upravené autorom. [24] .....</i>	<i>30</i>
<i>Obr. 4-7 Aplikácia regulácie frekvencie – upravené autorom. [24].....</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 4-8 Aplikácia umelej zálohy – upravené autorom [24]. .....</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 4-9 Aplikácia vyhladenia výroby zdrojov s kolísavým výkonom – upravené autorom. [24] ..</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 4-10 Blokové schéma UPS on-line systému. ....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 4-11 Blokové schéma line-interactive UPS systému. [27].....</i>	<i>35</i>
<i>Obr. 4-12 Funkcia UPS systému ako záložného zdroja – upravené autorom. [27].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 4-13 Funkcia UPS systému pre úpravu parametrov kvality el. energie – upravené autorom. [27].....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 5-1 Optimálny pracovný rozsahu SoC Li-B – upravené autorom. [30] .....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-2 Nabíjacia charakteristika Li-B – upravené autorom [31].....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 5-3 Závislosť napätia Li-B na SOC pre rozdielne teploty, pre C- rate 1 – upravené autorom. [31].....</i>	<i>41</i>



<i>Obr. 5-4 Závislosť napätia Li-B na SOC pre rozdielny C-rate, pri 20°C – upravené autorom [31].</i>	41
<i>Obr. 5-5 Pokles kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov [32]</i>	42
<i>Obr. 5-6 Trendová krivka poklesu kapacity Li-B v závislosti na počte plných cyklov</i>	43
<i>Obr. 5-7 Vývojový diagram programu batériovej aplikácie peak-shaving</i>	53
<i>Obr. 5-8 Znázornenie výpočtu IRR metódou lineárnej interpolácie – upravené autorom</i>	57
<i>Obr. 5-9 Ročný diagram spotreby riešeného objektu</i>	59
<i>Obr. 5-10 A - Ročný diagram spotreby riešeného objektu a SoC batérie</i>	62
<i>Obr. 5-11 A - Ročný diagram optimalizovanej spotreby riešeného objektu</i>	63
<i>Obr. 5-12 A - Približená časová os x diagramu spotreby na čas najvyššej výkonovej špičky</i>	63
<i>Obr. 5-13 A - Graf oblasti vybíjania batérie</i>	64
<i>Obr. 5-14 A - Priebeh poklesu kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov</i>	64
<i>Obr. 5-15 A - Chybová krivka invertora</i>	65
<i>Obr. 5-16 A - Prehľad mesačných platieb za prekročenie RK v stávajúcom stave</i>	65
<i>Obr. 5-17 A - Peňažné toky plynúce z realizácie investičného projektu v jednotlivých rokoch</i>	66
<i>Obr. 5-18 B - Ročný diagram skutočnej, optimalizovanej spotreby objektu a SoC batérie</i>	69
<i>Obr. 5-19 B - Približená časová os x diagramu spotreby na čas najväčšieho poklesu SoC batérie</i>	70
<i>Obr. 5-20 B - Graf oblasti vybíjania batérie</i>	70
<i>Obr. 5-21 B - Priebeh poklesu kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov</i>	71
<i>Obr. 5-22 B - Chybová krivka invertora</i>	71
<i>Obr. 5-23 B - Peňažné toky plynúce z realizácie investičného projektu v jednotlivých rokoch</i>	72
<i>Obr. 6-1 Obecná radiaca logika batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving</i>	75
<i>Obr. 6-2 Bloková schéma paralelného zapojenia batériového systému pre aplikáciu peak-shaving</i>	77
<i>Obr. 6-3 Osadenie merania v trafostanici riešeného objektu</i>	78
<i>Obr. 6-4 Odoberaný výkon objektu meraný v sekundových intervaloch</i>	79
<i>Obr. 6-5 Štvrt' hodinový priemerný výkon objektu počas doby merania</i>	79
<i>Obr. 6-6 Odoberaný výkon objektu v rámci hodiny počas doby najväčšieho využitia batériového úložiska na základe štvrt' hodinových maxím z roku 2016</i>	80
<i>Obr. 6-7 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre <math>\frac{1}{4} \text{ max} = 624 \text{ kW}</math></i>	82
<i>Obr. 6-8 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre <math>\frac{1}{4} \text{ max} = 641 \text{ kW}</math></i>	82
<i>Obr. 6-9 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre <math>\frac{1}{4} \text{ max} = 610 \text{ kW}</math></i>	83
<i>Obr. 6-10 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre <math>\frac{1}{4} \text{ max} = 508 \text{ kW}</math></i>	83

## ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 3-1 Základné vlastnosti lítium-iónových batérií podľa technológie [18] .....</i>	<i>20</i>
<i>Tab. 3-2 Prehľad základných výhod a nevýhod využitia jednotlivých LI-batérií.....</i>	<i>23</i>
<i>Tab. 5-1 Poplatky za rezervovanú kapacitu podľa napäťovej hladiny a distribučnej spoločnosti [38].....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 5-2 Sumarizácia prípadovej štúdie A .....</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 5-3 Sumarizácia prípadovej štúdie B .....</i>	<i>73</i>
<i>Tab. 6-1 Vybíjanie batérie BYD 2560 Wh do záťaže.....</i>	<i>84</i>

## ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

### *Skratky*

AA-CAES	Adiabatic Advanced - Compresed Air Energy Storage
BESS	Battery Energy Storage System
CAES	Compresed Air Energy Storage
Co.	Corporation
Corp.	Corporation
C-rate	Current rate
CSP	Concentrating Solar Power
ČR	Česká Republika
DoD	Depth of Discharge
E-rate	Energy rate
ES	Elektrizačná sieť
IRR	Internal Rate of Return
LCO	Lithium cobalt dioxide
LFP	Lithium iron phosphate
LiB	Litium-Ion battery
Li-ion	Litium-Ion battery
Li-O	Litium-Oxygen
Li-S	Litium-Sulfur
LMO	Lithium manganese oxide
LTO	Lithium titanate oxide
MRK	Mesačná rezervovaná kapacita
NaNiCl	Sodium-Nickel-Chloride battery
NAS	Sodium–Sulfur battery
NCA	Nickel cobalt aluminium oxide
Ni-Cd	Nickel–Cadmium battery
NiMH	Nickel-Metal Hydride
NN	Nízke napätie
NPV	Net Present Value
OZE	Obnoviteľné zdroje energie
RP	Rezervovaný príkon
RRK	Ročná rezervovaná kapacita

---

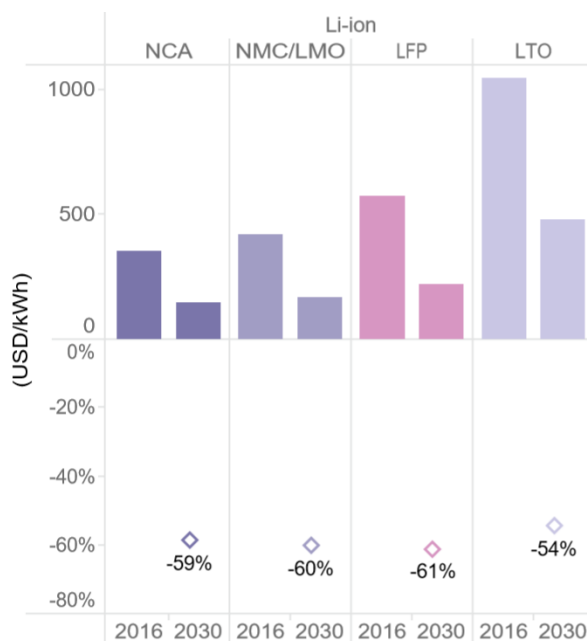
SoC	State of Charge
UPS	Uninterruptible Power Supply)
VN	Vysoké napätie
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery
VVN	Veľmi vysoké napätie
ZBFB	Zinc Bromide Flow Battery
ZEBRA	Zero Emissions Batteries Research Activity

**Jednotky**

%	Percento
°C	Stupeň Celzia
g/cm <sup>3</sup>	Gram na centimeter kubický
g/mol	Gram na mól
GW	Gigawatt
h	Hodina
Hz	Hertz
Kč	Česká koruna
kV	Kilovolt
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatthodina
m	Minúta
mAh·g <sup>-1</sup>	Miliampérhodina na gram
MW	Megawatt
MWh	Megawatthodina
s	Sekunda
USD	Americký dolár
V	Volt
Wh·kg <sup>-1</sup>	Watthodina na kilogram
μm	Mikrometer

# 1 ÚVOD

Znižujúce sa náklady na technológiu skladovania elektrickej energie pomocou Li-ion batérií otvárajú možnosti ich rozšíreného využitia pre stacionárne aplikácie. Podľa predpokladu štúdie *IRENA – Electricity storage and renewables, costs and markets to 2030*, by do roku 2030 malo dôjsť k zníženiu ceny Li-ion batérií o 54 – 61 % v závislosti na konkrétnej technológii vid'. Obr. 1-1.



Obr. 1-1 Predikcia vývoja cien Li-ion batérií do roku 2030 [5]

Priemyselné objekty (veľkoodberatelia elektrickej energie) dlhodobo čelia problémom s optimálnym nastavením rezervovanej kapacity, tak, aby nedochádzalo k jej prekročovaniu alebo zbytočnému nadsadeniu. Obe varianty vedú k zbytočne vynaloženým finančným prostriedkom zo strany prevádzkovateľa objektu.

V súčasnosti sa na trhu nachádzajú regulačné systémy štvrťhodinových maxím, ktoré fungujú na princípe sledovania trendu spotreby objektu a v prípade, že by mohlo dôjsť k prekročeniu zmluvnej hodnoty rezervovanej kapacity odopnú vybrané záťaže objektu tak, aby došlo k poklesu odberu elektrickej energie, čím sa objekt vyhne penalizáciám za prekročenie rezervovanej kapacity.

Táto diplomová práca skúma možnosť využitia batérií pre regulačný systém štvrťhodinových maxím tzv. peak-shaving. Slovné spojenie peak-shaving je pôvodom z anglického jazyka voľným prekladom „vykrývanie výkonových špičiek“, avšak anglický výraz nemá ekvivalent v českom ani slovenskom jazyku. Batériový systém pracujúci v aplikácii peak-shaving reguluje prekročenia rezervovanej kapacity tak, že injektuje potrebné množstvo elektrickej energie do záťaže objektu, čo vedie k zníženiu odberu elektrickej energie z distribučnej siete a obdobnému efektu ako pri odopnutí záťaže.

## 2 MOŽNOSTI AKUMULÁCIE ELEKTRICKEJ ENERGIE

V súčasnosti dochádza k rozširovaniu možnosti akumulácie elektrickej energie. V súvislosti s neustále vznikajúcimi a vyvíjajúcimi sa druhmi akumulácie môžeme rozdeliť technológiu skladovania na štyri základné skupiny:

- Mechanická akumulácia energie
- Akumulácia vo forme tepla
- Akumulácia elektromagnetickými dejmi
- Elektrochemická akumulácia

### 2.1 Mechanická akumulácia energie

Elektrická energia je transformovaná na iný druh energie a to na potenciálnu alebo zotrvačnú, následne sa táto akumulovaná energia získava späť reverzným princípom na elektrickú energiu. Využitie mechanickej akumulácie je využívané primárne v oblasti veľkých výkonov. Podľa princípu akumulácie sem radíme prečerpávacie vodné elektrárne, ktoré využívajú potenciálnu energiu veľkého objemu vody. Taktiež do tejto kategórie spadá akumulácia kinetickej energie pomocou rotačných hmôt - zotrvačníky a akumulácia tlakovej energie CAES (Compressed Air Energy Storage) a AA-CAES (Adiabatic Advanced - Compressed Air Energy Storage), ktoré fungujú na princípe akumulácie stlačeného vzduchu v úložiskách [5].

### 2.2 Akumulácia vo forme tepla

Elektrickú energiu je možné uložiť vo forme tepla a následne ju využiť pre vykurovanie alebo opätovnú premenu na elektrickú energiu. Hlavným rozdielom medzi systémami akumulácie vo forme tepla je úložné tekuté médium (voda, roztavené soli), ktoré je akumulované v akumulčných nádržiach. Ďalším možným využitím tejto technológie je akumulácia tepelnej energie do látok pevného skupenstva ako napr. skaly, betón, zliatiny kovov...[2].

### 2.3 Akumulácia elektromagnetickými dejmi

Pre akumuláciu elektrickej energie na princípe elektromagnetického poľa sú primárne využívané systémy tvorené superkondenzátormi a supravodivými cievkami. Akumulácia elektrickej energie do superkondenzátorov dosahuje vysokej účinnosti, avšak cena superkondenzátorov v súčasnosti je značne vyššia ako cena inej možnosti akumulácie elektrickej energie. Supravodivé cievky pozostávajú zo supravodivého materiálu a systému chladenia. Hlavným problémom akumulácie supravodivou cievkou je udržanie teploty, pri ktorej supravodiču klesá odpor k nulovej hodnote. Udržanie procesu supravodivosti cievky je značne finančne nákladné.

### 2.4 Elektrochemická akumulácia

Pod elektrochemický princíp akumulácie radíme batérie, regeneračné batériové systémy a palivové články.

Systém akumulácie za pomoci palivových článkov je založený na využití elektrickej energie na tvorbu vodíka, ktorý môže byť využitý pri spätnom procese výroby elektrickej energie. Avšak akumulácia elektrickej energie pomocou palivového článku dosahuje nízku účinnosť približne 30 %. V Európe sa v súčasnosti nachádza niekoľko inštalácií využívajúcich princíp uschovania vodíku s výkonom 10 – 100 MW.

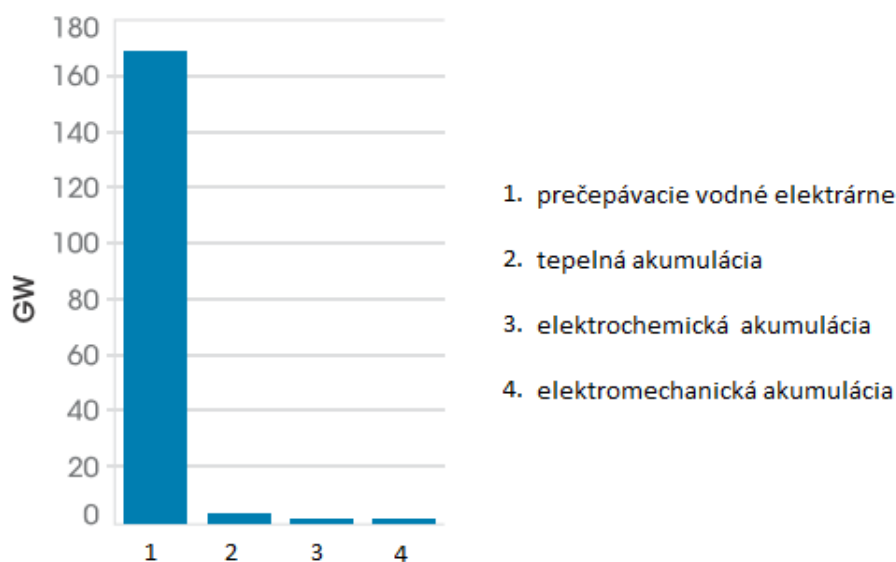
V súčasnosti využívané články, z ktorých pozostávajú batérie môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín a to na primárne a sekundárne články. Primárne články sú tvorené galvanickými článkami, ktoré neumožňujú opätovné nabíjanie. Sekundárne články sú článkami akumuláčnymi, ktoré môžu byť opätovne nabíjané a vybíjané. Elektromotorické napätie jednotlivých článkov je veľmi malé a preto sú články zapojované v sériovo-paralelných kombináciách, súbor týchto článkov nazývame akumulátorovou batériou. [3]

Regeneračné batériové systémy s prietokovým elektrolytom sú akumuláčné zariadenia, ktoré využívajú premenu elektrickej energie na chemickú a naopak. Rozdiel od klasických sekundárnych batériových článkov je ten, že energia je uložená v dvoch rôznych elektrolytoch, ktoré sú od seba po celú dobu oddelené špeciálnou membránou. Obe elektródy reagujú iba s jedným roztokom elektrolytu, ktorý sa vytvoril v priebehu procesu nabíjania. Táto vlastnosť je veľkou výhodou batériových systémov s prietokovým elektrolytom, pretože elektrolyt je možné skladovať v neobmedzene veľkých zásobníkoch, pričom elektrolyt nepodlieha degradačným procesom. Výhodou systému akumulácie batérií s prietokovým elektrolytom je veľký počet nabíjacích cyklov (približne 10 tisíc)[4].

Oblasť akumulácie v rámci elektrochemických technológií prechádza v súčasnosti dynamic-kým vývojom. Detailnejším charakteristikám jednotlivých batériových akumulátorov a regenerač-ných batériových systémov sa bude venovať ďalšia kapitola tejto práce.

## 2.5 Výsledné zhrnutie možností akumulácie elektrickej energie

V rámci akumulácie elektrickej energie existuje značné množstvo technologických procesov, ktoré spadajú pod štyri základné fyzikálne princípy uvedené na začiatku kapitoly. Z Obr. 2-1 je zrejmé, že majoritný podiel prevádzkovej akumuláčnej kapacity vo svete pripadá vodným prečerpávacím elektrárnám. Aj keď prečerpávacie elektrárne dominujú akumuláčnou kapacitou, nie sú vhodnou akumuláčnou technológiou pre väčšinu priemyselných podnikov a to z dôvodu vysokých finančných nákladov a geografických podmienok.



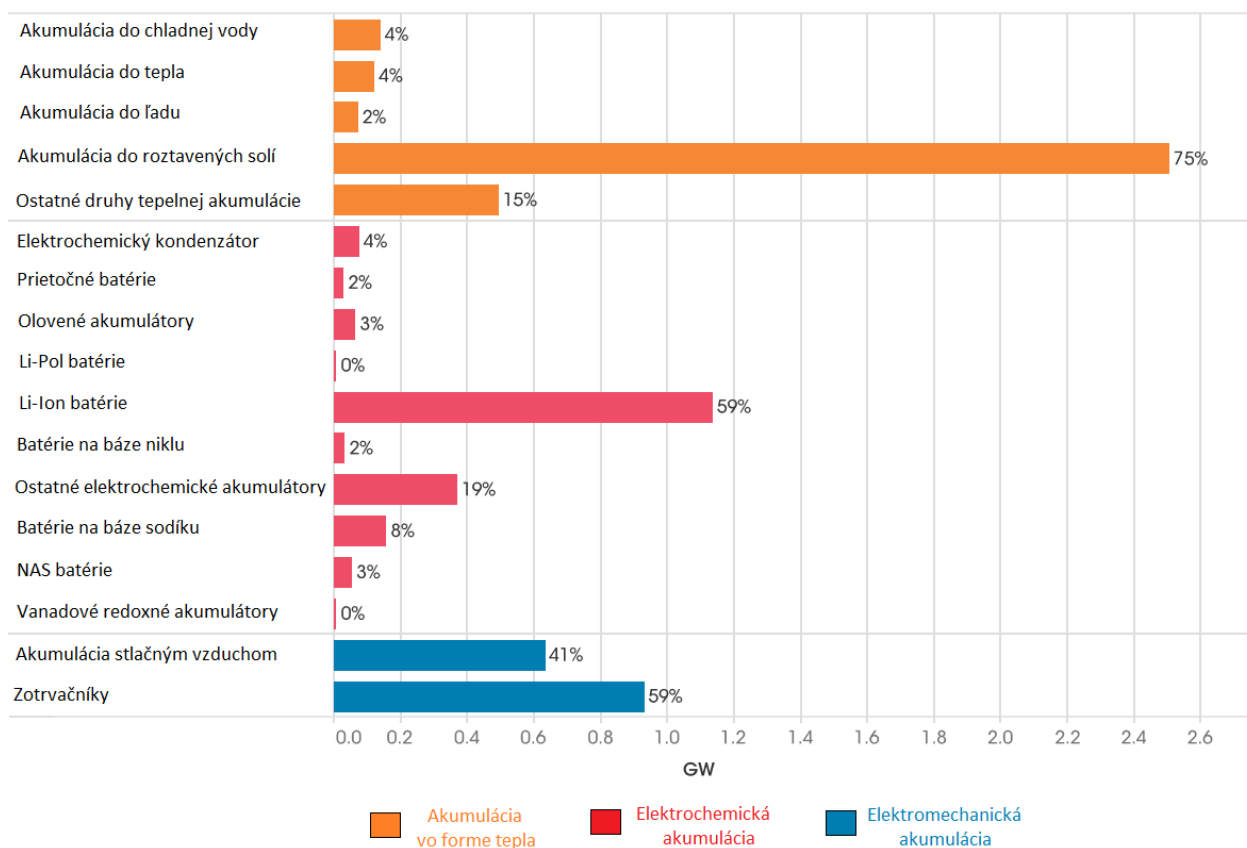
Obr. 2-1 Celková svetová prevádzková kapacita jednotlivých technologických skupín, 2017-upravené autorom [5]

Na tepelnú, elektrochemickú a elektromechanickú akumuláciu pripadá globálne celkovo 6,8 GW akumuláčnej kapacity. Aplikácie na uskladnenie tepelnej energie sa v súčasnosti sústreďujú na CSP (Concentrating Solar Power), čo umožňuje skladovať energiu tak, aby sa

zabezpečila dodávka elektrickej energie mimo špičkových hodín slnečného svitu do večerných hodín alebo po dobu 24 hodín. Technológia roztavenej soli je dominantným komerčným riešením, ktoré sa v súčasnosti využíva a predstavuje 3/4 z celosvetovo nasadenej kapacity tepelnej akumulácie pre využitie k pokrytiu spotreby elektrickej energie vid'. Obr. 2-2.

Doterajšie kapacity elektromechanickej akumulácie energie sú výsledkom relatívne malého počtu projektov s celkovým inštalovaným výkonom zotrvačníkov 0,9 GW, ktoré prevažne pochádzajú len z troch veľkých projektov. Celková kapacita akumulácie pomocou stlačeného vzduchu (CAES a AA-CAES) dosiahla 0,6 GW s inštaláciou iba troch veľkých projektov [5].

Elektrochemická akumulácia je jedným z najrýchlejšie sa rozvíjajúcich trhových segmentov, aj keď prevádzkovaná kapacita v batériových systémoch je približne 1,9 GW. Aj keď existuje veľké množstvo nových batériových systémov s veľkým potenciálom pre ďalší rozvoj, v roku 2017 predstavujú najväčší podiel prevádzkovaných batériových systémov lítium-iónové batérie (59 %). Napriek tomu existujú malé, ale dôležité príspevky z vysokoteplotných NAS (sodíkovo-sírových) batérií, elektrochemických kondenzátorov a batérií s prietokovým elektrolytom [5].



Obr. 2-2 Rozdelenie kapacity akumulácie tepelnej, elektrochemickej a elektromechanickej po jednotlivých technológiách (2Q/2017), upravené autorom [6]



## 3 ELEKTROCHEMICKÉ AKUMULÁTORY

Nasledujúca kapitola sa bude venovať základnej charakteristike technológií jednotlivých batériových akumulátorov, ktoré sú využívané, známe alebo perspektívne a mohli by tvoriť vhodný akumulačný systém pre pokrytie nárokov priemyselného objektu.

### 3.1 Olovené akumulátory

Olovené akumulátory boli vynájdené Gastonom Plantómom v roku 1859, ktorý demonštroval ich funkčnosť pre komerčné využitie pred francúzskou akadémiou vied v roku 1860. Aj po viac než 150 rokoch majú olovené akumulátory široké spektrum využitia, a to vďaka pomerne dobrej spoľahlivosti a hlavne nízkej cene. Hlavnými nevýhodami olovených akumulátorov sú nízka energetická hustota, dlhá doba nabíjania, vysoká hmotnosť, pomerne nízky počet cyklov, náchylnosť na okolitú teplotu a problematická likvidácia [7][8].

Olovené akumulátory majú jednoduchú konštrukciu, sú zložené z viacerých článkov v plastovej nádobe, ktorá je odolná proti reakciám s kyselinou. Z článkov sú priamo napájané olovené pláty (elektrody). Elektrolyt je vodný roztok kyseliny sírovej s hustotou 1,2-1,3 podľa technológie, články akumulátora sú sériovo prepojené, kde posledné krajné články sú vyvedené nad vonkajší kryt akumulátora. Väčšina článkov má otvory pre odvod plynov, ktoré vznikajú pri chemických procesoch alebo pre potrebu kontroly stavu elektrolytu v nádobe akumulátora [4][7][8].

Pri vybíjaní akumulátora klesá koncentrácia kyseliny sírovej, z dôvodu tvorenia vody. Naopak pri nabíjaní koncentrácia opäť stúpa. Z tohto dôvodu je možné kontrolovať stav nabitia akumulátora za pomoci hustoty kyseliny. Nominálne napätie článku je 2 V, napätie je merané na prázdno. Maximálne nabitie článku môže byť až 2,215 V. Vybitý článok má hodnotu 1,75 V, avšak pri hlbokom vybití môže dosiahnuť hodnotu 1,0 V a to hlavne pri nízkych teplotách. Najnovšie typy olovených akumulátorov sú väčšinou bez údržbové (nie je potrebné dopĺňovanie vody), s počtom cyklov až 2000 a ochranou proti vznikajúcim plynom pri prebíjaní akumulátora [4][8].

Najväčšia akumulačná stanica využívajúca technológiu olovených akumulátorov sa nachádza v Portoriku s výkonom 20 MW a kapacitou 14 MWh [6].

### 3.2 Nikel-kadmiové akumulátory

Nikel-kadmiové (Ni-Cd) akumulátory patria k jednému z najstarších typov ukladania energie. Nikel-kadmiový článok pozostáva zo systému kladných a záporných elektród oddelených separátormi, ktoré sú ponorené v elektrolyte.

Hlavnými výhodami Ni-Cd akumulátorov sú vysoká spoľahlivosť a životnosť, možnosť odberu veľmi vysokých prúdov, schopnosť rýchleho a veľmi rýchleho nabíjania, veľký rozsah pracovných teplôt pre vybíjanie a veľmi dobré mechanické vlastnosti. Nevýhodou tohto druhu akumulátorov je menšia merná energia na hmotnosť (objem), náhly pokles napätia na konci vybíjania a obsah kadmia, ktoré je klasifikované ako látka so škodlivým účinkom na životné prostredie. Ni-Cd akumulátory majú širokú škálu využitia a to hlavne tam, kde sa kladie vysoký dôraz na mechanickú odolnosť akumulátora alebo odolnosť voči vibráciám (akumulátorové náradie, letecká technika, zálohové systémy, železničná preprava a i.). Naopak Ni-Cd akumulátory nie sú vhodné pre aplikácie alebo prostredia, v ktorých by mal únik kadmia výrazný dopad na životné prostredie v jeho okolí [9][10].

Príkladom využitia Ni-Cd akumulátorov je inštalácia systému vo Fairbanks, Aljaška, USA, s inštalovaným výkonom 46 MW. Tento výkon je toto batériové ložisko schopné dodávať po dobu 5 min. Menovitý výkon systému je 27 MW počas doby 15 minút. V dôsledku inštalácie tohto systému bolo podľa záznamov zabránené viac než 60 % lokálnych výpadkov súvisiacich s dodávkou el. energie [6].

NiMH (Nickel-metal Hydride) akumulátory sú podobné batériám Ni-Cd s tým rozdielom, že pre elektródu je namiesto kadmia použitá zliatina absorbujúca vodík. Akumulátory NiMH majú podstatne lepšiu hustotu energie ako akumulátory Ni-Cd. Ďalšími výhodami NiMH technológie sú znížený pamäťový efekt akumulátoru, dlhšia životnosť a sú šetrnejšie k životnému prostrediu. Batériové systémy s NiMH technológiou sú vhodné pre použitie prenosných produktov alebo UPS (Uninterruptible power supply) systémov [10][11][12].

### 3.3 Sodíkovo-sírové akumulátory

Sodíkovo-sírové (NAS) akumulátory sa skladajú z kvapalnej síry na kladnej elektróde a kvapalného sodíku na elektróde zápornej. Sodík je vysoko reaktívny a s alkalickými kovmi ako sú lítium a draslík tvoria skupinu, ktorá môže dosahovať veľmi vysokej energetickej hustoty na jednotku hmotnosti.

Chemický proces na základe ktorého dochádza k nabíjaniu a vybíjaniu batérie, vyžaduje aby bola batéria udržiavaná pri teplote približne 300°C, preto sú často batérie na báze technológie NAS označované ako vysokoteplotné batérie [4][8][13].

Tento typ batérie má rádovo stovky Wh·kg<sup>-1</sup> (400 Wh·kg<sup>-1</sup>). V porovnaní s olovenou batériou 30 Wh·kg<sup>-1</sup>, je rozdiel viac ako jedenásťnásobný. Účinnosť NAS batérií sa pohybuje v rozmedzí 86-95 %. Hlavnou nevýhodou je nízka aplikačná pružnosť a to z dôvodu potreby zahriatia článku na prevádzkovú teplotu, pri ktorej bude mať batéria vhodné vlastnosti k svojej funkčnosti. Z uvedeného dôvodu sú NAS batérie uplatniteľné tam, kde dochádza k pravidelnému nabíjaciemu a vybíjaciemu cyklu, kedy je udržiavaná stála prevádzková teplota [4][8][13].

Najväčším batériovým systémom s technológiou NAS akumulátorov je inštalácia v rozvodni v Buzene, prefektúra Fukuoka, Japonsko s výkonom 50 MW a menovitou kapacitou batériového systému 300 MWh s možnou dobou využitia 6 h. Tento systém je súčasťou pilotného projektu pre vyváženie dodávky el. energie prostredníctvom veľkokapacitných systémov pre ukladanie energie. Systém bol dodaný spoločnosťou Mitsubishi Electric Corp. pre Japonského distribútora el. energie Kyushu Electric Power Co. Inštalovaný systém primárne napomáha k udržiavaniu požadovanej frekvencie siete a vyhladzuje nevyváženosť tokov energie, ktoré sú zapríčinené príspevkami obnoviteľných zdrojov do siete [6].

### 3.4 Sodík-nikel-chloridové akumulátory

Často označované ako variant NAS akumulátorov s o niečo nižšou pracovnou teplotou. Môžeme sa stretnúť s označením ZEBRA (Zero Emissions Batteries Research Activity), pričom skutočné chemické zloženie batérie je NaNiCl. Nabíjanie a vybíjanie batérie prebieha medzi katódou, ktorá pozostáva primárne z niklu (Ni) a chloridu sodného (NaCl) a anódou, ktorá je vyhotovená zo sodíka (Na). Medzi elektródami sa nachádzajú dva elektrolyty a to jeden pevný, ktorý je z keramického oxidu hlinitého a kvapalný elektrolyt NaAlCl<sub>4</sub>, ktorého úlohou je zlepšenie vodivosti medzi katódou a keramickým elektrolytom. Teplota, pri ktorej dosahuje batéria požadovaných vlastností sa pohybuje v rozmedzí 270-350°C. Napätie jedného článku akumulátora je 2,08 V.

Ako aj predošlá technológia batérií NAS, tak aj batérie NaNiCl sú vhodné pre použitie práve tam, kde dochádza k opakovaným vybíjaciím a nabíjaciím cyklom bez prestávok a to z dôvodu udržiavania prevádzkovej teploty batérií. Životnosť batérií NaNiCl je približne 3000 cyklov. Ak dôjde k poruche v jednom článku batérie, dôjde k poklesu napätia, avšak porucha nevedie k okamžitej odstávke celého batériového systému [8][14][15].

Jedným z najväčších projektov s technológiou NaNiCl batérií sa nachádza na Sicílii v Taliansku. Tento projekt s nominálnym výkonom 4 MW má byť časťou systému 40 MW pre zabezpečenie kontinuálnej dodávky elektrickej energie v rámci Sicílie a Sardínie. [6]

## 3.5 Lítiové akumulátory

### 3.5.1 História lítiových akumulátorov

Prvý primárny lítiový článok bol vynájdený v polovici šesťdesiatych rokov minulého storočia. Od počiatku sa vyznačovali značne vysokou mernou energiou, kapacitou, veľmi nízkym samovybíjaním a ďalšími kladnými vlastnosťami. Prvé pokusy o výrobu nabíjateľných lítiových akumulátorov na začiatku osemdesiatych rokov neboli uspokojivé z dôvodu nízkeho napätia článkov, nízkej kapacity a komplikovanej alebo drahej výroby. Veľký prelom v technológií nastal až v roku 1990, kedy zástupcovia firmy SONY predstavili novú technológiu, ktorá využíva ako aktívny materiál pre zápornú elektródu zmes grafitu obohateného lítiom a polyolefínov. Názov Li-Ion zaviedol výkonný riaditeľ firmy SONY Energytec pán K. Tozawa [16].

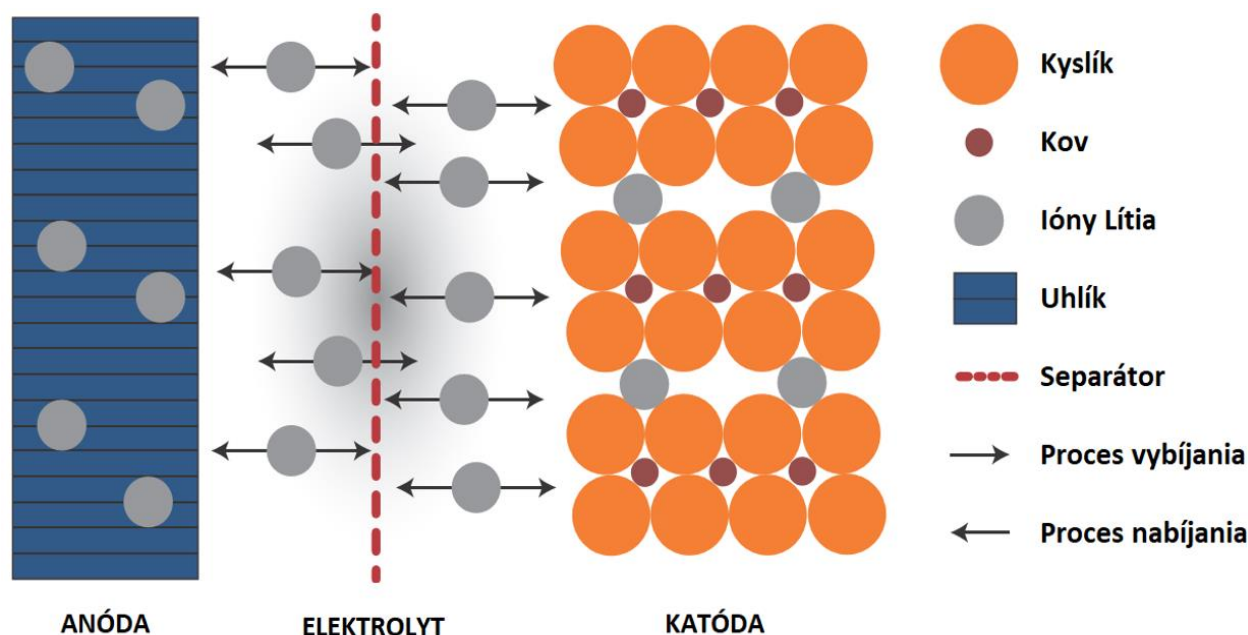
### 3.5.2 Primárny lítiový článok

Lítiové batérie vykazujú najvyššiu rast z pomedzi všetkých ostatných batérií na trhu a úspešne predstihli všetky konkurenčné systémy. Lítium je najľahší pevný prvok v chemickej periodickej tabuľke (atómová hmotnosť 6,941 g/mol, hustota 0,53 g/cm<sup>3</sup>) a má najnižší elektrochemický potenciál zo všetkých kovov. Vysoké napätie buniek lítiových článkov umožňuje konštrukciu batérií iba s jednou bunkou. Primárne lítiové batérie sú nenabíjateľné a preto sú určené pre jedno použitie. Anóda je vyrobená z kovového lítia a katóda je vyrobená z oxidu manganičitého (MnO<sub>2</sub>). Primárne lítiové batérie (LiMnO<sub>2</sub>) sú komerčne najrozšírenejšou technológiou primárnych lítiových článkov [17][18].

### 3.5.3 Sekundárny lítiový článok

Lítiové sekundárne batérie (lítium-iónové batérie) poskytujú viacnásobnú reverzibilnú transformáciu chemickej energie na elektrickú, z tohto dôvodu je možné túto technológiu využívať opakovane. Lítium-iónové akumulátory sa skladajú z katódy, anódy, separátoru a elektrolytu. Označenie lítium-iónové akumulátory zahŕňa rôzne druhy akumulátorov, ktoré fungujú na rovnakom alebo podobnom princípe. Lítium-iónové akumulátory môžeme rozdeľovať na základe materiálov, ktoré boli použité pre konštrukciu katódy alebo anódy, ďalej je ich možné rozdeliť na základe lítiovej soli, materiálu separátora a rozpúšťadla. Zmeny využitých materiálov pre jednotlivé komponenty lítium-iónových akumulátorov majú výrazný vplyv na funkčnosť a ich vlastnosti [17][18].

*Obr. 3-1* zobrazuje v abstraktnom poňatí prevádzkový princíp a základnú štruktúru lítiového článku s katódou na báze oxidu kovového lítia a uhlíkovej anódy. Tento obrázok predstavuje len jeden konkrétny príklad štruktúry a funkcie Lítium-iónového akumulátora a nevzťahuje sa na iné možné anódové a katódové materiálové kombinácie [5].



Obr. 3-1 Principiálna schéma lítiového článku s katódou na báze oxidu kovového lítia a uhlíkovej anódy, upravené autorom [5]

**Elektrolyt lítium-iónových akumulátorov:** Voľba vhodného elektrolytu pre lítium-iónové akumulátory je veľmi dôležitá aj napriek tomu, že sa ho v tomto type batérií nachádza malé množstvo. Elektrolyty vhodné pre lítium-iónové akumulátory môžeme rozdeliť podľa skupenstva na tekuté a tuhé. Tekuté elektrolyty sa skladajú z roztoku lítiových solí a rozpúšťadiel. Použitím tuhých elektrolytov odpadlo obmedzenie na únik kvapalného elektrolytu. Toto opatrenie zvyšuje životnosť a bezpečnosť akumulátorov. Jedným z riešení sú polymérne elektrolyty. Akumulátory, ktoré ako elektrolyt využívajú polymérne elektrolyty sa nazývajú ako lítium-polymérové (Li-pol, LiPo) [19].

**Separátory lítium-iónových akumulátorov:** Separátory nachádzajúce sa v lítium-iónových akumulátoroch sú zväčša tvorené polymérovou membránou s hrúbkou 10-30  $\mu\text{m}$ . Základnou úlohou separátoru je elektricky izolovať anódu od katódy [19].

**Názvoslovie a vlastnosti anódových materiálov lítium-iónových akumulátorov:**

- C – graphite ( $\text{C}_6$ )
- LTO – lithium titanate oxide ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )

**Názvoslovie a vlastnosti katódových materiálov lítium-iónových akumulátorov:**

- LCO – lithium cobalt dioxide ( $\text{LiCoO}_2$ )
- LFP – lithium iron phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ )
- LMO – lithium manganese oxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )
- NCA – nickel cobalt aluminium oxide  $\text{Li}(\text{Ni}_{0,85}\text{Co}_{0,1}\text{Al}_{0,05})\text{O}_2$

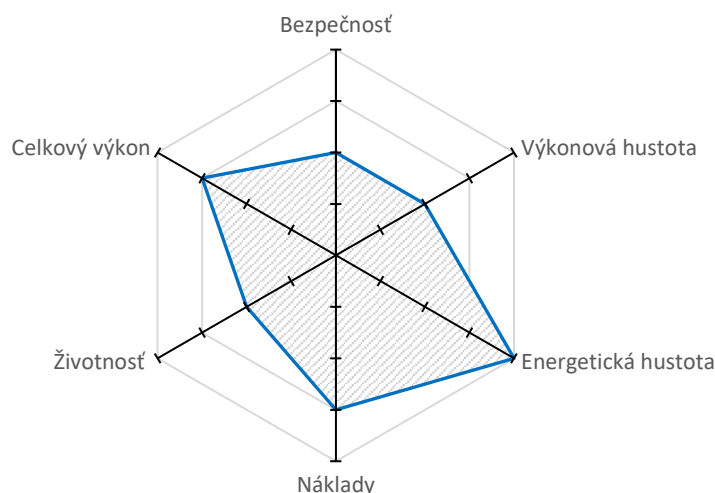
Presné názvoslovie lítium-iónových batérií je skladané podľa využitých materiálov na anóde a katóde napr. LCO / C pre lítium kobaltový článok s uhlíkovou anódou alebo LFP / LTO pre článok lítium-železo-fosfát a anóda z oxidu lítio-titaničitého [17][18].

Tab. 3-1 Základné vlastnosti lítium-iónových batérií podľa technológie [18]

Materiál	Merná kapacita (mAh/g)	Napätie článku (V)	Energetická hustota (Wh·kg <sup>-1</sup> )	Životnosť (cykly)
LCO	140	3.7	110-200	500-1000
LMO	146	3.8	100-150	1000
NCA	180	3.6	200-260	2000-3000
NMC	145	3.6	150-220	2000-3000
LFP	170	3.3	90-120	>3000
LTO	170	2.2	60-80	>5000

**Batérie na báze LCO:** Jedná sa o dobre zvládnutú technológiu z dôvodu jej dlhého využitia na trhu. Táto technológia disponuje pomerne nízkou životnosťou a vysokou energetickou hustotou. Batérie na báze LCO sú najrozšírenejšou technológiou využívanou v prenosných zariadeniach a to z dôvodu vysokej rýchlosti nabíjania. Z dôvodu nižšej bezpečnosti prevádzky a vysokej ceny kobaltu nie sú LCO batérie vhodné pre použitie pre elektromobilizmus alebo väčšie aplikácie v rámci skladovania el. energie. Ďalšou nevýhodou je pomerne zlá tepelná stabilita batérií [5][18][20].

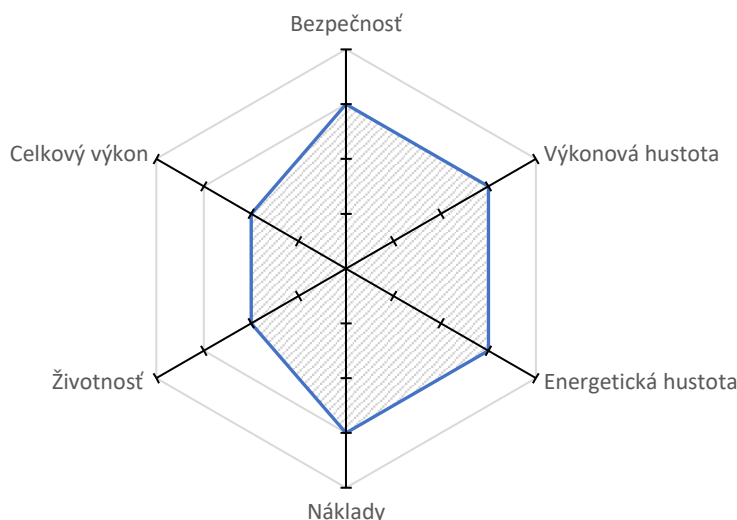
Výrobcovia: Sony, Kokam



Obr. 3-2 Diagram základných vlastností LCO batérií

**Batérie na báze LMO :** Batérie využívajúce túto technológiu majú vyššie napätie (3,8 V až 4 V) článku ako batérie na báze LCO, avšak na druhej strane disponujú nižšou energetickou hustotou ako batérie LCO (cca. 20%). Výhodami batérií na báze LMO sú vyššia tepelná stabilita, vyššia bezpečnosť a nižšie náklady. Nevýhodami technológie LMO sú pomerne nízka životnosť a vysoké straty kapacity. Z dôvodu nízkej životnosti batérie nie je táto technológia vhodná pre elektromobilizmus a ani pre väčšie aplikácie v rámci skladovania el. energie. Pre batéριοvé úložiská sa často používa kombinácia LMO a NMC článkov. Kombinovaný systém na princípe LMO a NMC poskytuje balans medzi výkonom a nákladmi na takýto systém. Samostatné LMO batérie našli uplatnenie primárne v medicínskych zariadeniach, elektrickom náradí a prenosných elektrických zariadeniach [5][18][20].

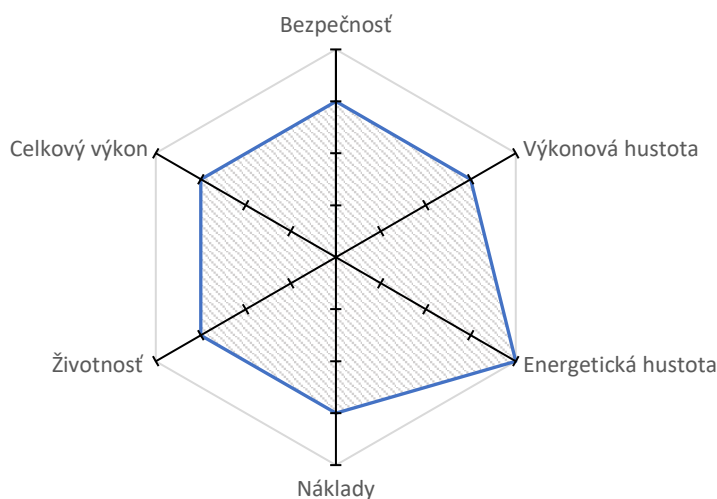
Výrobcovia: Hitachi, Sanyo, LG chem, Samsung



Obr. 3-3 Diagram základných vlastností LMO batérií

**Batérie na báze NMC:** Táto technológia disponuje dobrým celkovým výkonom, energetickou hustotou, nižšími hodnotami samovznietenia a životnosťou. Tieto systémy sú kandidátom pre využitie ako veľké akumulačné systémy, tak aj ako batérie pre elektromobilizmus. Výrobcovia prechádzajú z kobaltových systémov smerom k niklovým, a to z dôvodu vysokých cien kobaltu. Systémy na báze niklu majú oproti kobaltu, nižšie náklady a dlhšiu životnosť, ale o niečo nižšie napätie článkov. V súčasnosti systémy NMC prechádzajú vývojom a v budúcnosti sa počíta s ich veľkým uplatnením na trhu [5][18][20].

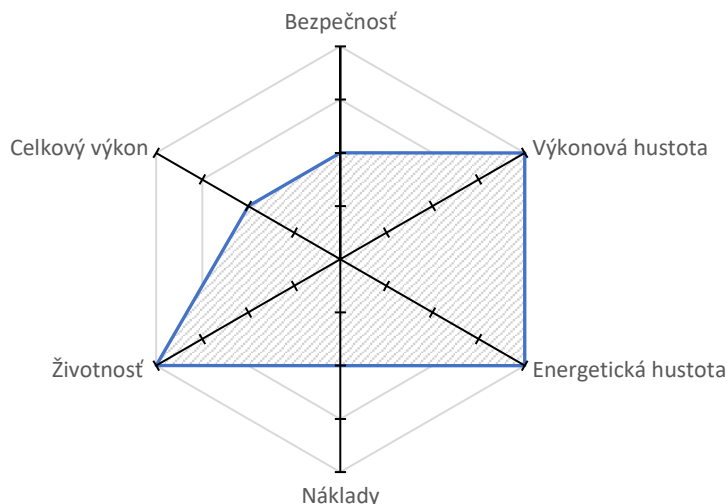
Výrobcovia : PEVE, LG Chem., A123systems a i.



Obr. 3-4 Diagram základných vlastností NMC batérií

**Batérie na báze NCA:** Technológia NCA je pokrokom z predchádzajúcich batérií založených na báze LCO. NCA batérie v porovnaní s LCO disponujú vyššou bezpečnosťou, avšak majú nižšie napätie článku. Výhodami batérií na báze NCA technológie sú dobrá energetická hustota, výkonová hustota a životnosť. Nedostatkami tejto technológie sú znížená bezpečnosť a pomerne vysoké náklady. Batérie NCA sú využívané primárne elektromobilizme (Tesla Motors) a priemysle [5][18][20].

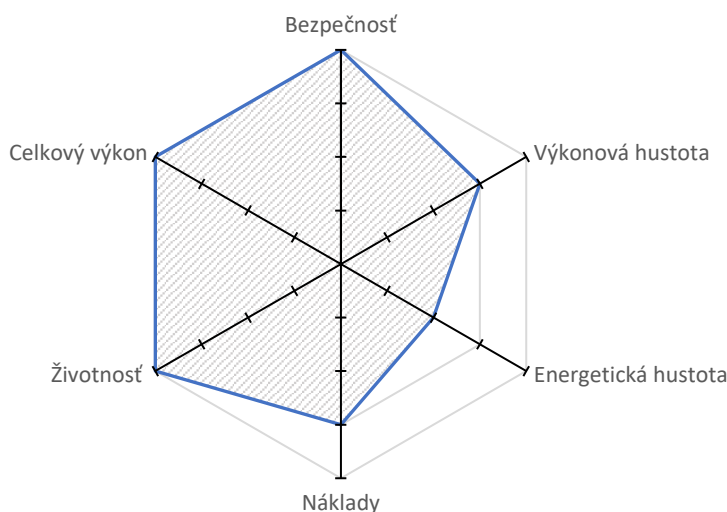
Výrobcovia : SAFT, Panasonic



Obr. 3-5 Diagram základných vlastností NCA batérií

**Batérie na báze LFP:** Táto technológia batérií predstavuje mimoriadne atraktívnu možnosť ukladania elektrickej energie, a to pre svoje dobré vlastnosti ako sú vysoká kapacita, nízke náklady (nižšie než u LCO), malý vplyv na životné prostredie (netoxické katódové materiály), dlhá životnosť, veľmi dobrá tepelná stabilita. Batérie LFP fungujú na podobnom princípe ako batérie NCA, avšak s vyššou úrovňou bezpečnosti systému. Batérie LFP sa považujú za vhodné pre použitie v elektromobilite a taktiež pre stacionárne systémy ukladania elektrickej energie z dôvodu vyššie spomenutých kladných vlastností tejto technológie. Nevýhodou tejto technológie je nižšie menovité napätie článkov a tým nižšia dosiahnuteľná energetická hustota. V súčasnosti sa sústreďuje značné úsilie v oblasti výskumu LFP technológií, ktoré by mohlo v budúcnosti priniesť zvýšenie výkonu článku LFP batérie [5][18][20].

Výrobcovia: BYD, A123, EIG

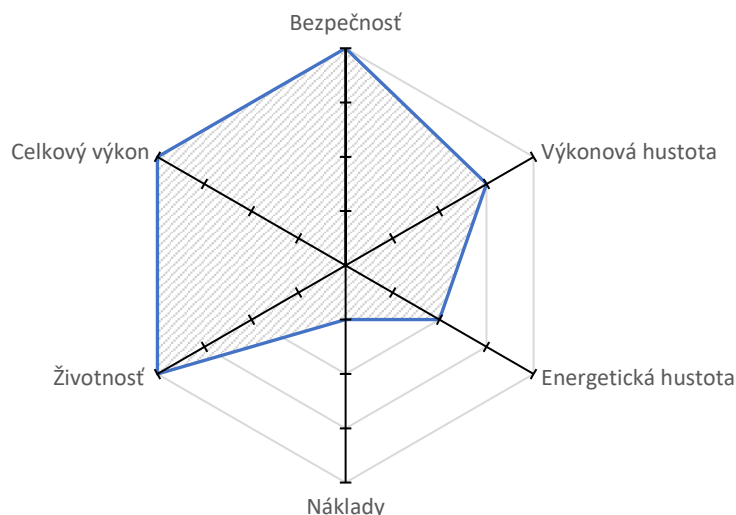


Obr. 3-6 Diagram základných vlastností LFP batérií

**Batérie na báze LTO:** Technológia batérií LTO poskytuje dobré vlastnosti (značná stabilita cyklu, dlhá kalendárna životnosť). Batériové články na báze LTO majú nižšie napätie článkov, čo má priaznivý vplyv na bezpečnosť akumulátora. LTO batérie sú rýchlo nabíjateľné a vďaka ich chemickej stabilite môžu byť tieto batérie prevádzkované vo väčšom teplotnom rozmedzí.

Nevýhodami tohto typu batérií sú nižšia energetická hustota a hlavne vysoká cena. Batérie na báze LTO sú využívané pre elektrické pohony, armádne účely a UPS [5][18][20].

Výrobcovia: Altairnano, EIG



Obr. 3-7 Diagram základných vlastností LTO batérií

### Porovnanie základných vlastností Li-ion batériových technológií

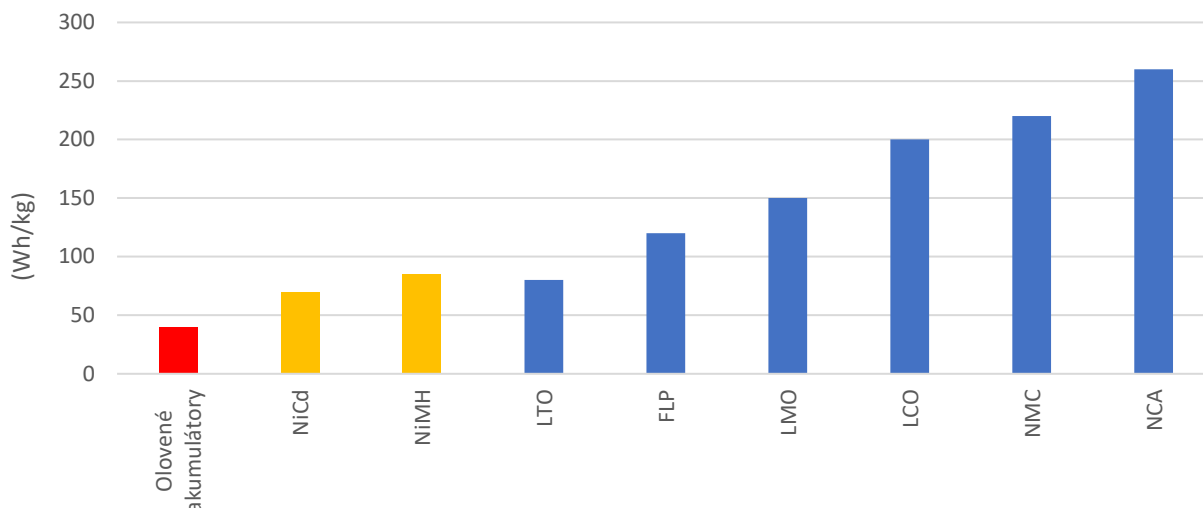
Základný prehľad výhod a nevýhod pre využitie jednotlivých Li-ion batériových technológií je uvedený v Tab. 3-2.

Tab. 3-2 Prehľad základných výhod a nevýhod využitia jednotlivých LI-batérií

	LCO	NMC	LMO	NCA	FLP	LTO
Výhody	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Vysoká hustota energie</li> <li>- Rýchlosť nabíjania</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobrá tepelná stabilita</li> <li>- Funkčnosť pri vysokých napätiach</li> <li>- Životnosť</li> <li>- Vysoká energetická hustota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nízke náklady</li> <li>- Dobrá tepelná stabilita</li> <li>- Bezpečnosť</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobrá životnosť</li> <li>- Vysoká energetická hustota</li> <li>- Vysoká výkonová hustota</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dobrá tepelná stabilita</li> <li>- Životnosť</li> <li>- Nízka cena</li> <li>- Bezpečnosť</li> <li>- Nízke straty samovybíjaním</li> <li>- Plochá vybíjacia charakteristika</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Veľmi dobrá tepelná stabilita</li> <li>- Životnosť</li> <li>- Rýchlosť nabíjania</li> <li>- Bezpečnosť</li> </ul>
Nevýhody	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Zlá tepelná stabilita</li> <li>- Nízka životnosť</li> <li>- Cena kobaltu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Patentové problémy v niektorých krajinách</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nízka životnosť</li> <li>- Straty kapacity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Znížená bezpečnosť</li> <li>- môže dôjsť k strate kapacity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Nižšia energetická hustota z dôvodu nízkeho napätia článku</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Vysoká cena titánu</li> <li>- Nizká energetická hustota</li> <li>- Nižšie napätie článku</li> </ul>

Na Obr. 3-8 je znázornené porovnanie energetickej hustoty olovených, niklových a lítiových batériových technológií. V rámci porovnania na základe energetickej hustoty dominuje NCA technológia s hodnotou energetickej hustoty cca. 260 Wh/kg. Avšak dominancia NCA batérií je viazaná iba k ich energetickej hustote v prípade, že budeme uvažovať parametre výkonovej hustoty, tepelnej stability, bezpečnosti a dĺžky života tak sa do popredia dostávajú batérie s technológiou LFP, NMC. V dĺžke života batérií dominuje technológia LTO [18].





Obr. 3-8 Porovnanie energetickej hustoty akumulátorov na báze olova, niklu a lítia – upravené autorom [18]

**Perspektívne lítiové technológie:** Technológie, ktoré sa zaoberajú novým prístupom k lítiu ako k materiálu na skladovanie elektrickej energie. Výskum nových technológií v rámci skladovania energie prebieha v posledných rokoch neustále, medzi perspektívne materiály pre použitie do budúcnosti, ktoré by mohli zvýšiť energetickú hustotu, životnosť a bezpečnosť patria:

- **Lítium kyslíkový akumulátor (Li-O<sub>2</sub>):** Vzhľadom na to, že aktívny materiál kyslík môže byť nasávaný z okolitého vzduchu, disponuje Li-O<sub>2</sub> batéria najvyššou potenciálnou energetickou a výkonovou hustotou z pomedzi všetkých batériových systémov. Okrem toho technológia sľubuje vyššiu bezpečnosť a nízky dopad na životné prostredie. Napriek spomenutým výhodám tejto technológie, sú tu aj pretrvávajúce problémy ako napríklad nízka kapacita akumulátora a nízka odolnosť voči vonkajším vplyvom prostredia, hlavne vlhkosti. Z dôvodu nutnosti vyriešenia týchto problémov sa nepredpokladá rozsiahla komercializácia tohto typu batérie v najbližších rokoch [5][18][19].
- **Lítium sírový akumulátor (Li-S):** Tento typ technológie batérií využíva síru ako aktívny materiál, ktorý je dostupný vo veľkých množstvách a je ekonomicky výhodný, taktiež umožňuje dosiahnuť veľmi vysokú energetickú hustotu až 400 Wh/kg (napr. v porovnaní s NMC technológiou je táto hodnota dvojnásobná). Vďaka chemickému zloženiu disponuje táto technológia prirodzenou ochranou proti prebíjaniu. Táto technológia batérií je napriek svojim výhodám v počiatočnom štádiu vývoja pričom musí byť prekonaných viacero problémov ako vysoká rýchlosť samovybíjania, nízka životnosť batérie (50-100 plných cyklov) [5][18][19].

### 3.6 Prietokové akumulátory

Prietokové batérie môžu byť taktiež opísané ako regeneračné palivové články, existujú v rôznych formách chemickej technológie, táto práca sa primárne zameriava na vanádové redoxné (VRFB) a zinko-bromidové (ZBFB) akumulátory. Oproti bežným akumulátorom sa prietokové akumulátory odlišujú v tom, že elektroaktívne materiály nie sú uložené v elektródach, ale sú rozpustené v roztokoch elektrolytov. Elektrolyty sú uložené v separovaných nádržiach mimo reakčnú jednotku. Z nádrží sú následne elektrolyty čerpané do reakčnej jednotky, kde prebieha reverzibilný elektrochemický proces (nabíjanie a vybíjanie akumulátora). Tento princíp je výhodou

prietokových akumulátorov a to z dôvodu, že elektrolyt môže byť skladovaný v neobmedzene veľkých zásobníkoch, pričom nepodlieha degradačným procesom. V reakčnej jednotke sú elektrolyty oddelené špeciálnou membránou, ktorá umožňuje prechod iónov medzi elektrolytmi, avšak membrána je jedným z mála prvkov technológie, ktoré majú obmedzenú životnosť a musia byť v priebehu prevádzky akumulátora vymenené.

Hlavné výhody prietokových akumulátorov:

- Možnosť nezávislého rozšírenia energetického a výkonového charakteru. Výkonová hustota je definovaná povrchom elektród v reakčnej nádobe akumulátora, pričom energetická hustota môže byť zmenená objemom elektrolytov uložených v zásobníkoch.
- Životnosť akumulátora je viac ako 10 000 plných cyklov.
- Nízke straty v standby režime batérie. V závislosti od aplikácie je možné uložiť nabitý elektrolyt na dlhší čas bez strát samovybíjaním.
- Využíva relatívne lacné a dobre dostupné materiály.
- Priestorová prispôsobivosť akumulátora.
- Hlboké vybíjanie akumulátora nemá výrazný vplyv na celkovú životnosť batérie.
- Dobrá bezpečnosť akumulátora a to hlavne z titulu veľmi dobrej tepelnej stability.
- Akumulátor môže byť jednoducho odstavený z prevádzky vypnutím čerpadiel elektrolytov.

Nevýhody prietokových akumulátorov zahŕňujú nižšiu účinnosť (napr. v porovnaní s lítiovými batériami) a taktiež celkovú štruktúru systému, ktorá v prípade výskytu problému môže viesť k vysokým nákladom na opravu a údržbu tohto systému. Taktiež celkový systém akumulátora obsahuje pomerne veľké množstvo pohyblivých prvkov oproti konvenčným batériám, pohyblivé prvky si vyžadujú napájanie a hospodárstvo, čo taktiež znižuje celkovú účinnosť prietokových akumulátorov. Návrh systému s prietokovým akumulátorom musí zohľadňovať riziko úniku kyselín. Spomenuté nevýhody môžu znížiť použiteľnosť tohto typu batérií v niektorých aplikáciách [5][8][21][22].

**Vanádiové redoxné akumulátory:** (VRFB) využíva redoxnú reakciu v reakčnej jednotke, ktorá je napájaná aktívnymi iónovými vanádiovými materiálmi z nádrží, čo vedie k prenosu elektrónov v elektrickom obvode (nabíjanie/vybíjanie). Prechod z režimu nabíjania na vybíjanie je prakticky okamžité (v rádoch ms). V porovnaní s klasickými akumulátormi má elektrolyt v nabitom stave len nepatrné straty samovybíjaním. Pokiaľ je nabitý elektrolyt uskladnený mimo reakčnú jednotku môže zotrvať v tomto stave prakticky neobmedzene dlhú dobu. Priestorová náročnosť inštalácie batériového systému s technológiou VRFB závisí hlavne na požadovanej energetickej hustote systému, pričom oddelené skladovanie elektrolytu umožňuje pomerne dobré priestorové prispôsobenie v rámci požadovanej aplikácie. Vzhľadom k minimálnym prevádzkovým nákladom a zanedbateľnému samovybíjaniu je možné zhodnotiť technológiu VRFB ako vhodnú pre záložný zdroj s extra rýchlym časom nábehu na plný výkon pre prevádzky vyžadujúce plné zabezpečenie napájania el. energiou. Prietoková batéria s technológiou VRFB bola ako jediná vo svete využitá pre veľké aplikácie [8][21][22][23].

Hlavné výhody technológie VRFB:

- Dlhá životnosť (10 000+ cyklov).
- Pomerne vysoká energetická účinnosť až 85 %.

- Jedna z najrozvinutejších typov prietokových batérií s viacerými demonštráciami a taktiež s väčšími inštaláciami rádovo v MW.
- Konštrukčný pomer výkonovej a energetickej hustoty možno optimalizovať tak, aby vyhovoval danej aplikácii.
- Rýchla doba odozvy systému.
- Dobrá tepelná stabilita systému.

Hlavné nevýhody technológie VRFB:

- Nie je vhodná pre nestacionárne aplikácie, z dôvodu rozpusteného elektrolytu a nízkej energetickej hustote.
- Pomerne vysoké ceny vanádu a membrány.

Najväčší projekt využívajúci technológiu VRFB schválila Čínska národná energetická správa, ktorý bude tvorený systémom desiatich 20 MW/80 MWh batérií. Tento systém bude umiestnený v meste Dalian, kde bude napojený na hlavnú sieť provincie Liaoning, v ktorej dochádzalo k výkyvom vplyvom extrémnych poveternostných podmienok. Po úplnom uvedení do prevádzky bude toto VRFB úložisko schopné pokrývať približne 8 % odhadovaného špičkového výkonu provincie Liaoning v roku 2020. Okrem funkcie vyhladzovania špičkového výkonu v sieti bude toto batériové úložisko fungovať ako dodatočná záťaž pre stabilizáciu siete a v núdzových prípadoch môže tento systém slúžiť pre nábeh z tmy. Tento projekt má byť uvedený v dvoch fázach, každá fáza projektu bude tvorená 100 MW/400 MWh. Predpokladané ukončenie projektu je naplánované na koniec roku 2018 [6].

**Zinko-bromidové akumulátory:** (ZBFB) je hybridná redoxná prietoková batéria. Reakčná jednotka ZBFB pozostáva z dvoch častí oddelených mikroporéznu membránou, kde sa v každej z častí nachádza elektróda (jedna pre zinkovú časť, druhá pre bromidovú). Systém taktiež obsahuje nádrže s elektrolytom podobne ako VRFB batéria. Celková kapacita akumulátora so ZBFB technológiou závisí od veľkosti plochy elektród ako aj od veľkosti zásobníkov elektrolytu [5][21][22].

Hlavné výhody technológie ZBFB:

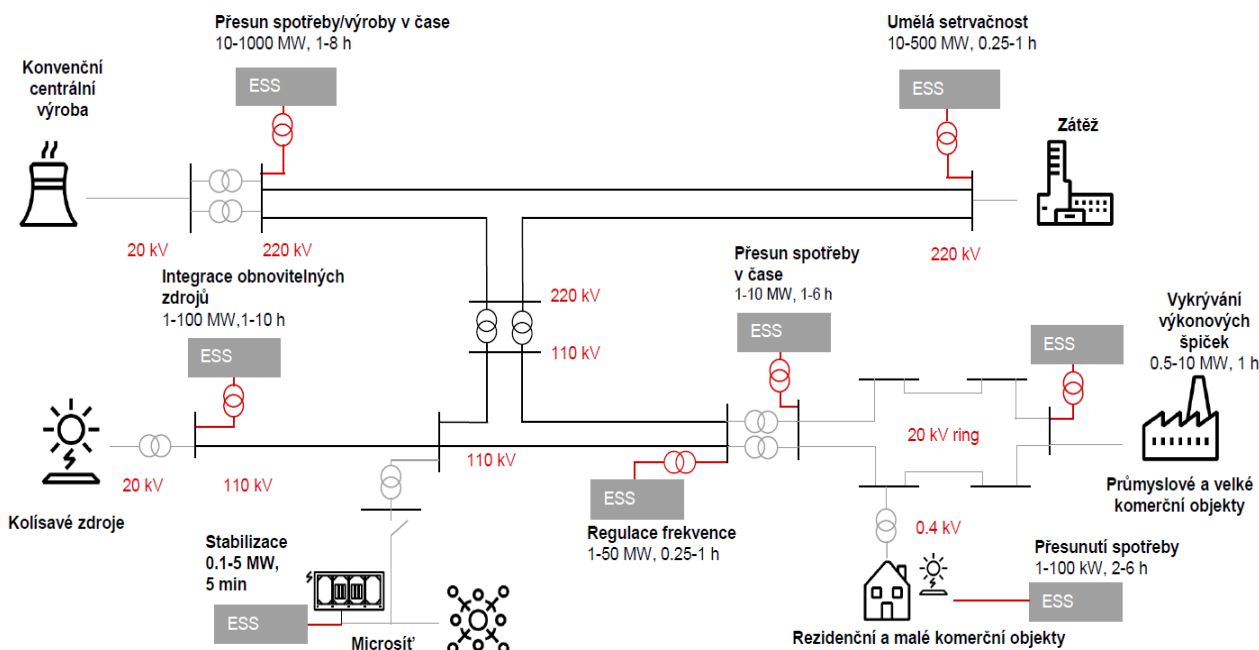
- Vyššie napätie článku ako u vanádiových prietokových batérií (1,8 V pre ZBFR a 1,4 V pre VRFB).
- Vysoká energetická hustota.
- Možnosť hlbokého vybíjania.

Hlavné nevýhody technológie ZBFB:

- Pre cirkuláciu a reguláciu teploty sú potrebné pomocné systémy.
- Väčšie náklady na elektródy, manipulačné zariadenia, membránu z dôvodu vysoko oxidačného charakteru brómidu.
- Vysoká miera samovybíjania (8-33 %) a nízka energetická účinnosť.
- Nižší počet cyklov ako u VRFB

## 4 APLIKÁCIE PRE VYUŽITIE BATÉRIOVÉHO ÚLOŽISKA

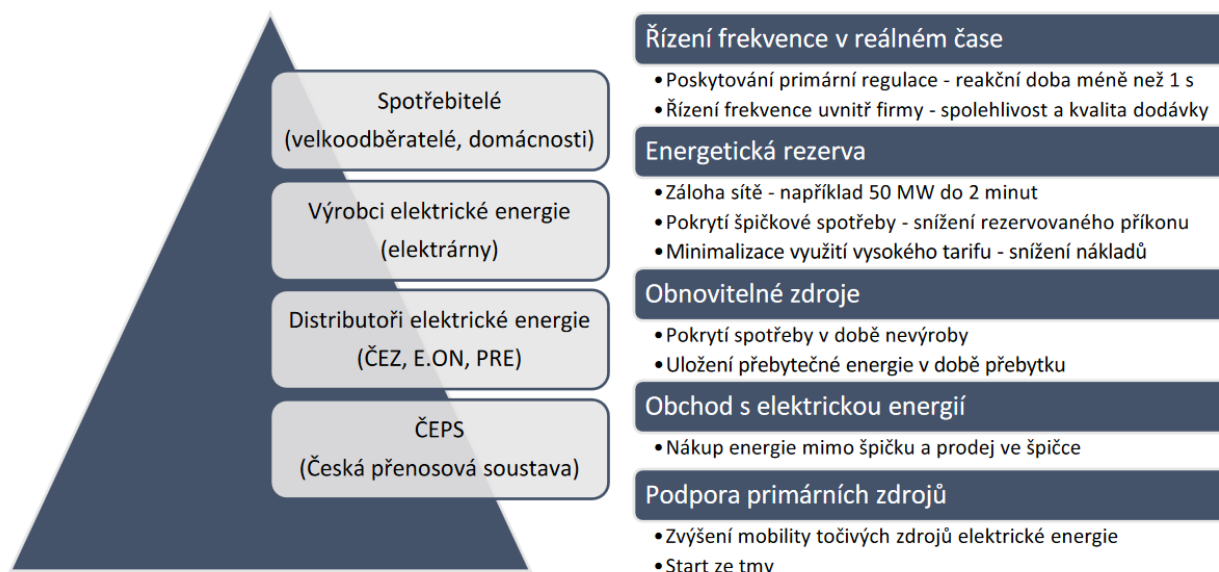
Batériové úložiská môžu zvýšiť integráciu zvyšujúcich sa podielov vyrobenej elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, ktorá je pomerne premenlivá, podporujú spotrebu elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov v mieste výroby a taktiež môžu napomáhať infraštruktúre distribučnej siete vysporiadať sa s dodávkou premenlivej energie. Systémové služby ako napríklad udržiavanie parametrov siete v súčasnosti z veľkej časti zabezpečujú konvenčné elektrárne. Alternatívni poskytovatelia podporných služieb sa budú stávať čoraz žiadanejší v rámci trendu smerujúceho k obnoviteľným zdrojom.



Obr. 4-1 Potenciálne lokácie a aplikácie batériových úložísk v ES. [24]

Podľa Obr. 4-2 je možné konštatovať, že využitie batériových systémov v rámci elektrizačnej sústavy (ES) je pomerne rozmanité a je ho možné uplatniť v každom zo sektorov ES od výroby až po dodávku el. energie koncovému zákazníkovi. Vhodnosť a uplatniteľnosť batériového závisí od mnohých faktorov prevádzky ES a jej parametrov a skladbe. Hlavnými dôvodmi pre nasadzovania batériových úložísk sú: [24]

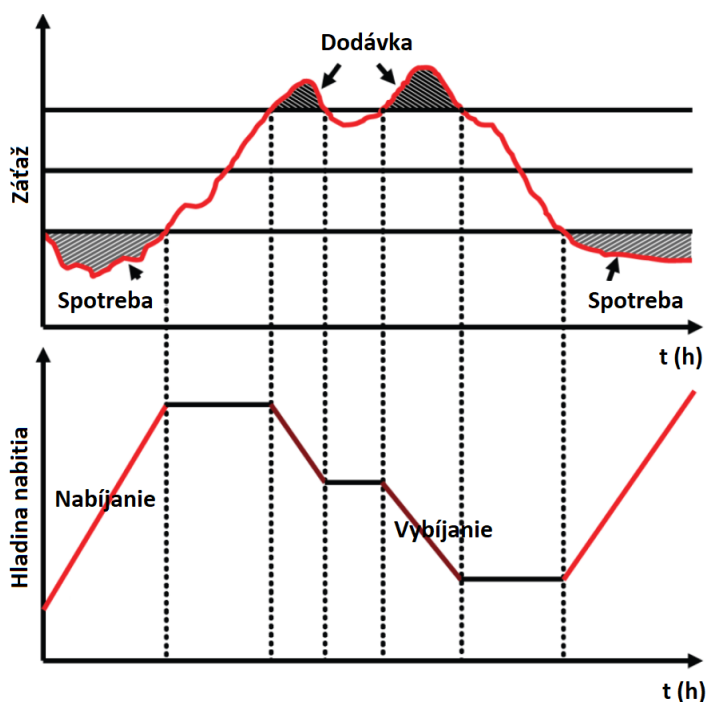
- Vysoké požiadavky na dostupnosť el. energie
- Zvyšujúca sa spotreba el. energie
- Odstraňovanie uhoľných a jadrových elektrární
- Vzostup obnoviteľných zdrojov
- Elektrifikácia dopravy
- Nasadenie Smart-Grid technológií
- Regulačné mechanizmy



Obr. 4-2 Rozdelenie možnosti využitia batériových úložísk v rámci ES-ČR. [28]

#### 4.1 Presun spotreby v čase (Peak Shifting)

Presun spotreby v čase je princíp využitia batériového úložiska pre uskladnenie energie v dobe nízkeho odberu v ES a dodanie el. energie v čase, kedy je naopak odber v ES vyšší podľa odberového diagramu. V rámci využitia batériového úložiska pre presun výroby/spotreby v čase sa počíta s pokrytím dlho trvajúceho previsu/nedostatku výkonu v ES, radovo v hodinách. Tento princíp sa využíva napríklad pre časový posun spotreby el. energie z obnoviteľných zdrojov, kedy počas špičkovej výroby OZE sa energia ukladá a následne sa spotrebuje, keď výroba OZE poklesne. Tento princíp využitia batériového systému môže byť použitý ako pre veľké elektrárne s OZE tak aj pre rezidenčné objekty (rodinné domy, bytové domy). Hlavnou výhodou je maximalizácia spotreby energie vyrobenej z OZE.

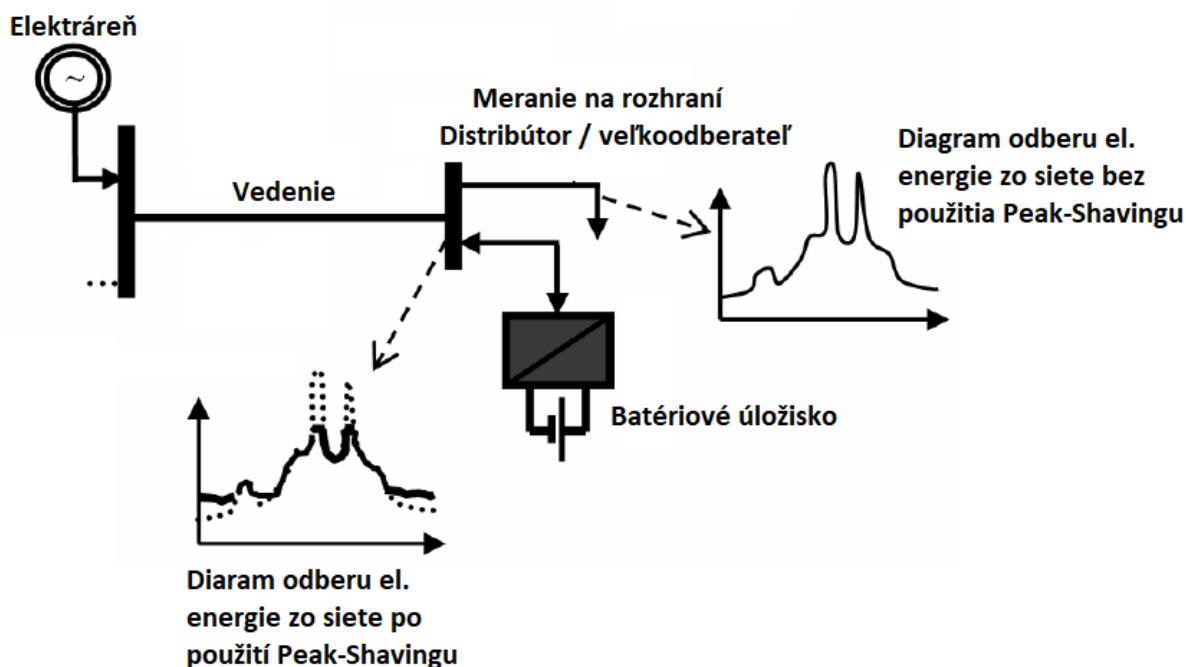


Obr. 4-3 Aplikácia presunu spotreby v čase – upravené autorom. [24]

## 4.2 Vykrývanie výkonových špičiek (Peak Shaving)

Priemyselné objekty (veľkoodberatelia) na hladinách VN a VVN častokrát prevádzkujú zariadenia a stroje vyžadujúce značné množstvo energie v relatívne krátkom čase v priebehu dňa. Tieto krátkodobé zmeny nárastu odberu majú nepriaznivý vplyv na výrobu prenos a distribúciu. Z tohto dôvodu sú jednotlivým odberateľom stanovené rezervované kapacity výkonu a rezervovaného príkonu. V prípade, že dôjde k prekročeniu tejto zmluvnej hodnoty, sú veľkoodberateľovi účtované penále vo výške niekoľkonásobku mesačnej ceny za rezervovanú kapacitu vzťahnutú na každý MW prekročenej zmluvnej hodnoty. Dodržiavanie zmluvnej hodnoty rezervovanej kapacity je vyhodnocované na základe meraní okamžitého a priemerného príkonu objektu s 15 min intervalom (tzv. 15-minutové maximá).

Rezervovanú kapacitu delíme na ročnú alebo mesačnú, veľkoodberateľ si ju má možnosť zvoliť podľa charakteru prevádzky objektu. Cena za rezervovanú kapacitu objektu tvorí značnú časť z celkovej platby za energiu, preto je žiadúce ju optimálne prispôbiť prevádzke budovy, avšak tak aby nedochádzalo k prekročovaniu zmluvnej hodnoty. Optimálne prispôsobenie rezervovanej kapacity objektu nie je jednoduchá záležitosť a to hlavne v prípadoch odberateľov so značne premenlivou prevádzkou. Pre vykrývanie výkonových špičiek sa už mnoho rokov využíva technológia Peak-Shavingu, pričom sa využívali diesel-generátory alebo plynové turbíny pre veľké podniky, ktoré počas doby zvýšenej spotreby priemyselného objektu generovali el. energiu priamo v objekte a tým znižovali okamžitý výkon odoberaný zo siete. Avšak dnes je možné vo veľkých priemyselných objektoch inštalovať batériové úložiská, ktoré sú nabíjane počas nízkeho odberu objektu resp. v nočných hodinách, a pri špičkových odberoch naopak el. energiu v krátkych intervaloch predávajú objektu, tým pádom znižujú okamžitý výkon odoberaný zo siete vid'. Obr. 4-4 [25][26].

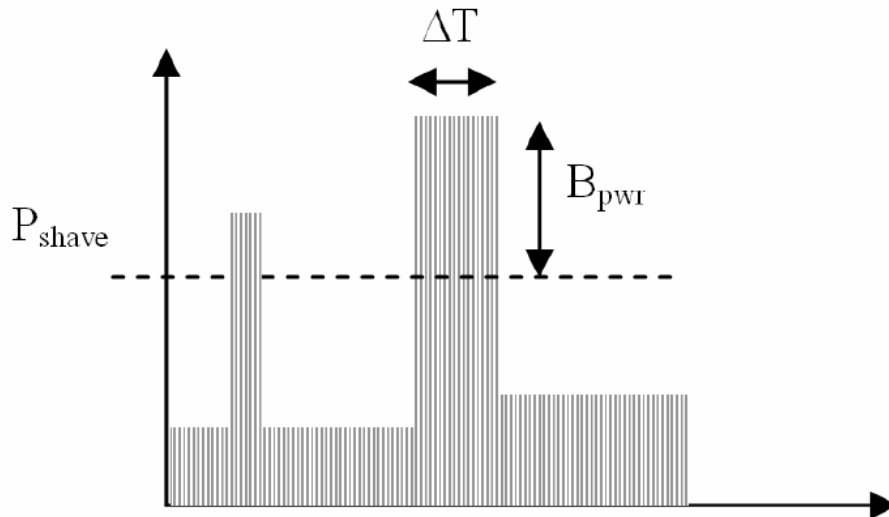


Obr. 4-4 Meraný diagram spotreby el. energie s/bez uplatnenia Peak-Shavingu [25].

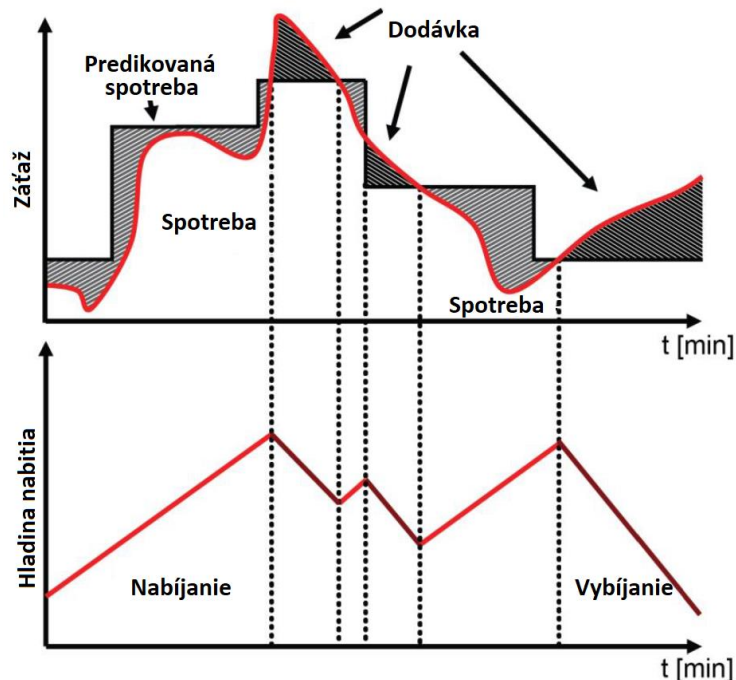
Odberová výkonová špička je relatívny pojem, ktorý potrebuje jasne definovanú referenčnú hodnotu. Výkonové špičky sú na diagramoch zaťaženia charakterizované ako oblasť nad referenčnou hodnotou výkonu (rezervovaná kapacita objektu). Podľa Obr. 4-5 hodnota  $P_{Shave}$  reprezentuje výkon (rezervovanú kapacitu), ktorá by nemala byť prekročená.  $B_{pwr}$  je okamžitá

hodnota výkonu z batériového úložiska pre Peak-Shaving a  $\Delta T$  reprezentuje čas vybíjania batériového úložiska. Oblasť nad hodnotou  $P_{Shave}$  za čas  $\Delta T$  je potrebná kapacita batériového úložiska pre pokrytie výkonovej špičky označuje sa ako  $B_{cap}$ . Vzťah medzi  $B_{cap}$  a  $B_{pwr}$  popíšeme ako:[25]

$$B_{cap} = B_{pwr} \cdot \Delta T \quad (kWh; kW, h) \quad (4.1)$$



Obr. 4-5 Základný princíp funkcie Peak-Shavingu. [25]



Obr. 4-6 Aplikácia Peak-Shavingu – upravené autorom. [24]

Na Obr. 4-6 je zobrazený odberový diagram s aplikáciou Peak-shavingu, avšak s funkciou predikovanej spotreby el. energie priemyselného objektu. Tento spôsob nie je založený na jednej konštantnej hodnote  $P_{Shave}$  reprezentujúcej rezervovanú kapacitu ako na Obr. 4-5, ale hodnota  $P_{Shave}$  v tomto prípade je premenlivá v čase [25].

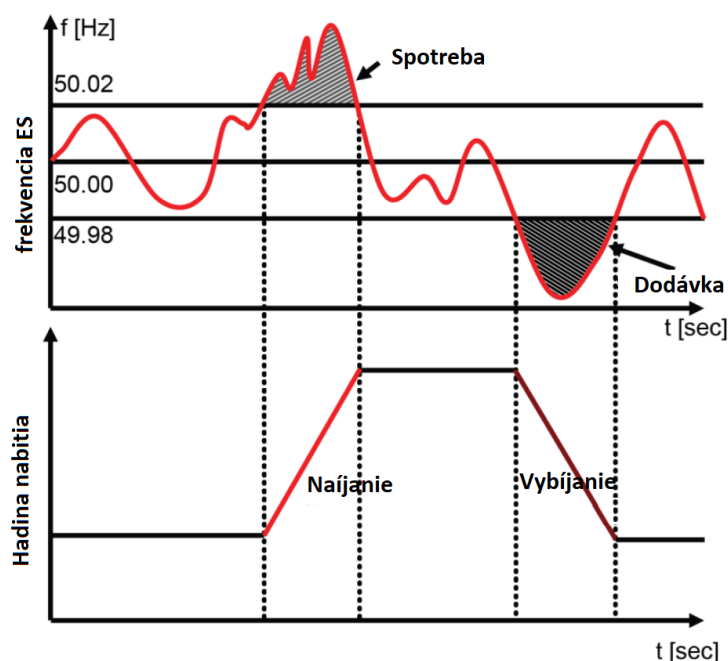


Princíp Peak-Shavingu môže mať značné uplatnenie v spojitosti s dynamicky sa rozvíjajúcou oblasťou elektromobilizmu, kedy by špičkové hodnoty výkonu odoberané rýchlo-nabíjacími stanicami pre nabíjanie elektromobilov boli pokrývané práve energiou z batériového úložiska. Toto riešenie môže byť uplatnené ako pre veľkoodberateľov na napäťovej hladine VVN a VN, tak aj pre rezidenčné objekty (rodinné domy, bytové domy). Pre rezidenčné objekty by aplikovanie Peak-Shavingu malo význam v tom, že by nebolo nutné zvyšovať hodnotu hlavného istiaceho prvku, ktorá predstavuje hodnotu rezervovanej kapacity objektu na napäťovej hladine NN.

Hlavnou výhodou využitia aplikácie Peak-Shavingu je zamedzenie sankcií za prekročenie zmluvnej hodnoty rezervovanej kapacity. Pri správnej optimalizácii batériového úložiska môže dôjsť k zníženiu rezervovanej kapacity objektu a tým i k značným úsporám na platbe za el. energiu v prospech veľkoodberateľa.

### 4.3 Regulácia frekvencie

Regulácia frekvencie pomocou batériových úložísk funguje na princípe sledovaní dovolených medzných hodnôt odchýlok frekvencie podľa normy a využíva schopnosť batériového úložiska správať sa ako záťaž (odber) alebo ako zdroj (výroba). Túto schopnosť využíva na základe fungovania ES, kedy pri prebytku výkonu stúpa frekvencia v ES a naopak v prípade nedostatku výkonu frekvencia v ES klesá. V prípade, že dôjde k nárastu frekvencie batériové úložisko sa správa ako spotrebič a prebytočný výkon z ES odoberá. Ak dôjde k poklesu frekvencie úložisko naopak výkon do ES dodáva vid' Obr. 4-7.



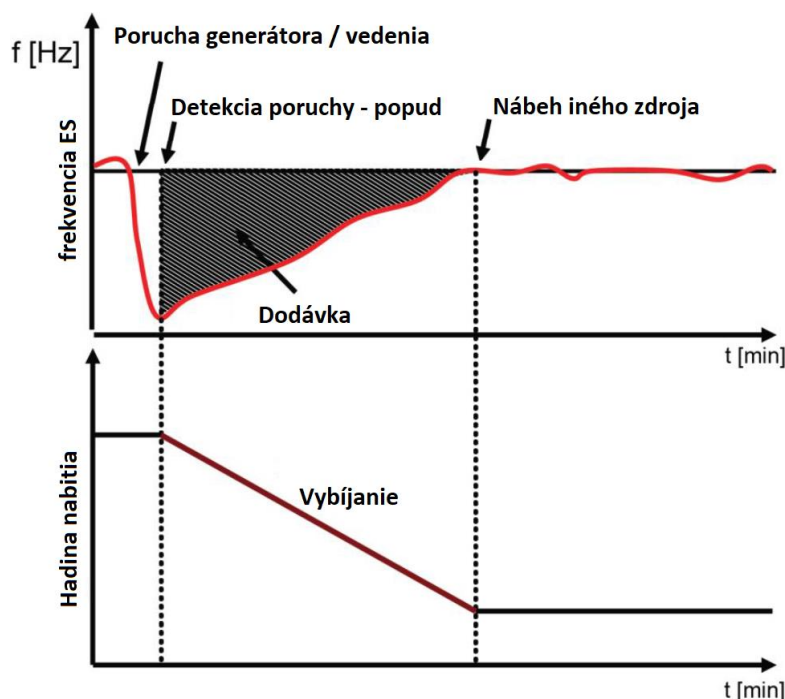
Obr. 4-7 Aplikácia regulácie frekvencie – upravené autorom. [24]

Batériové úložisko pre použitie v rámci regulácie frekvencie musí byť schopné rýchlej reakcie na zmenu frekvencie v ES rádovo v desiatkach milisekúnd. Výhodami nasadenia tohto systému sú zvýšená spoľahlivosť prevádzky ES, zlepšenie kvalitatívnych parametrov el. energie a zníženie potreby podporných služieb pre reguláciu frekvencie [26].



## 4.4 Umelá záloha

Využitie batériových úložísk ako možnosť umelej zálohy sa vyznačuje tým, že batériové úložiska sa trvalo prevádzkuje v stave vysokej pripravenosti (trvalo nabité) pre prípad, že by došlo k výpadku iného zdroja el. energie, čo by viedlo ako k poklesu generovaného výkonu, tak aj k zníženiu frekvencie v ES.



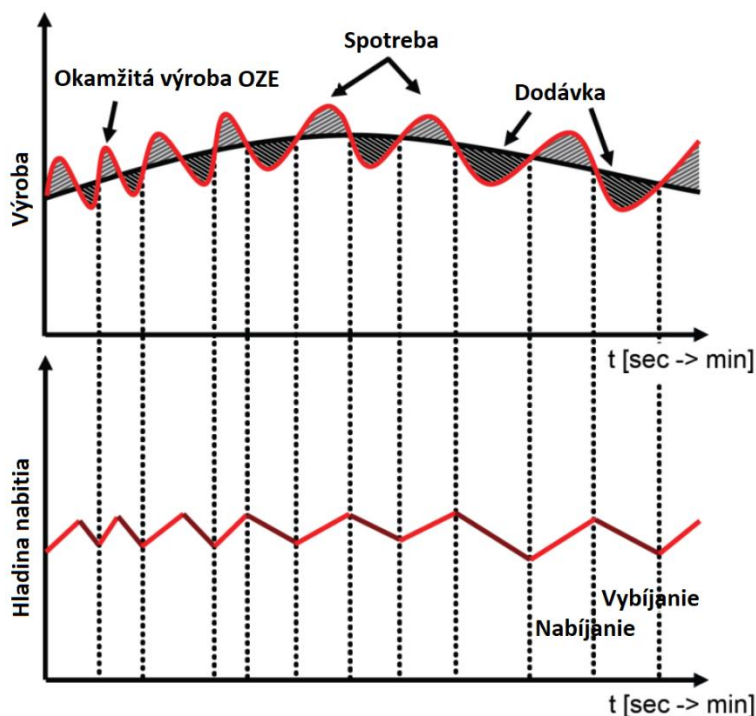
Obr. 4-8 Aplikácia umelej zálohy – upravené autorom [24].

Na Obr. 4-8 môžeme pozorovať zjednodušený prípad, kedy došlo v ES k poruche na jednom z hlavných prvkov výroby alebo dodávky el. energie, čím došlo k poklesu frekvencie v ES. Batériové úložisko v plne nabitom dostáva informáciu o tom, že došlo k náhlej zmene frekvencie a začína do ES injektovať veľký výkon po dobu niekoľkých minút, kým nedôjde k nábehu záložných zdrojov v ES. Batériové úložisko sa opätovne začne nabíjať po vyriešení poruchového stavu a v čase mimo odberovej špičky. Využitím systému umelej zálohy by bolo možné znížiť prevádzkové náklady pri udržiavaní točivých rezerv v ES.

## 4.5 Vyhladenie výroby zdroja s kolísavým výkonom

Zdroje s kolísavým výkonom (intermitentné zdroje) ako napríklad fotovoltaičné elektrárne, veterné elektrárne, ktoré sú v posledných 10 rokoch v značnom rozmachu dodávajú do ES el. energiu, avšak ich výroba je silne závislá na meteorologických podmienkach a je pomerne náročné stanoviť presnú predikciu ich výroby. Výroba energie z týchto intermitentných zdrojov sa môže meniť rádovo v sekundách, preto je nutné aplikovať opatrenia, ktoré by zabránili negatívnym vplyvom na prevádzku ES. Jednou z možností je využitie batériového úložiska k redukcii výkonových špičiek výroby týchto zdrojov.

Požiadavky kladené na batériové úložisko pre využitie vyhladenia výkonových špičiek so zdrojmi kolísavého napätia sú rýchlosť odozvy batériového úložiska a taktiež dostatočná kapacita pre nabíjanie a vybíjanie.



Obr. 4-9 Aplikácia vyhladenia výroby zdrojov s kolísavým výkonom – upravené autorom. [24]

Výhodou tejto aplikácie batériového úložiska je zvýšenie efektívnosti prevádzky OZE vzhľadom na ich využitie a taktiež výpomoc pre splnenie pravidiel pre prevádzkovanie sústavy.

## 4.6 UPS – Záložný zdroj

UPS (uninterruptible power supply) aplikácie sú známe už niekoľko rokov. Záložné zdroje neprerušovaného napájania majú za úlohu zabezpečiť vybraným náročným spotrebičom nepretržitú dodávku elektrickej energie po dobu poklesu alebo výpadku napätia napájacej siete, a navyše môžu prispieť aj k zlepšeniu kvalitatívnych parametrov dodávky el. energie potlačením elektromagnetických rušivých javov prichádzajúcich zo strany siete. Záložné zdroje boli a sú využívané hlavne v datacentrách, priemyselných podnikoch s technológiou citlivou na kvalitu el. energie, nemocniciach, jadrových elektrárnach atď. V dnešnej dobe sa začíname stretávať s použitím UPS systémov v rezidenčných a rekreačných objektoch.

Jednotka UPS (UPS unit) je kompletne tvorená najmenej jedným z nasledujúcich funkčných blokov: usmerňovač, invertor a batériový systém poprípadne iný zásobník el. energie (superkondenzátor). Jednotka UPS môže taktiež spolupracovať s ďalšími jednotkami UPS a vytvárať tak paralelné alebo redundantné zapojenie UPS [29].

Batériový systém UPS je skupina prepojených akumulátorových článkov fungujúcich ako zásobník energie pre zálohovanie napájacej siete. V UPS sú najčastejšie používané bez obslužné uzavreté články, ktoré nemajú negatívny vplyv na okolie. Batérie sú často súčasťou jednotky UPS. Pri veľkých zdrojoch prípadne veľkej kapacity, môžu batérie tvoriť samostatných celok, často v modulovom prevedení. Kapacita batérie určuje zálohovaciu dobu, to znamená maximálnu dobu batériovej prevádzky, ktorá môže byť požadovaná v dĺžke od niekoľkých minút, potrebných pre preklenutie krátkodobých porúch v sieti alebo nábeh náhradného zdroja až po desiatky minút pre špeciálne zálohové systémy. Dôležitým faktorom je doba potrebná k obnoveniu zálohovacích schopností vybitých batérií. Ďalším dôležitým faktorom je doba života batérie, ktorá je silne závislá na počte cyklov a teplote okolia prevádzky batériového systému [27][29].

Rozdelenie UPS podľa prevedenia:

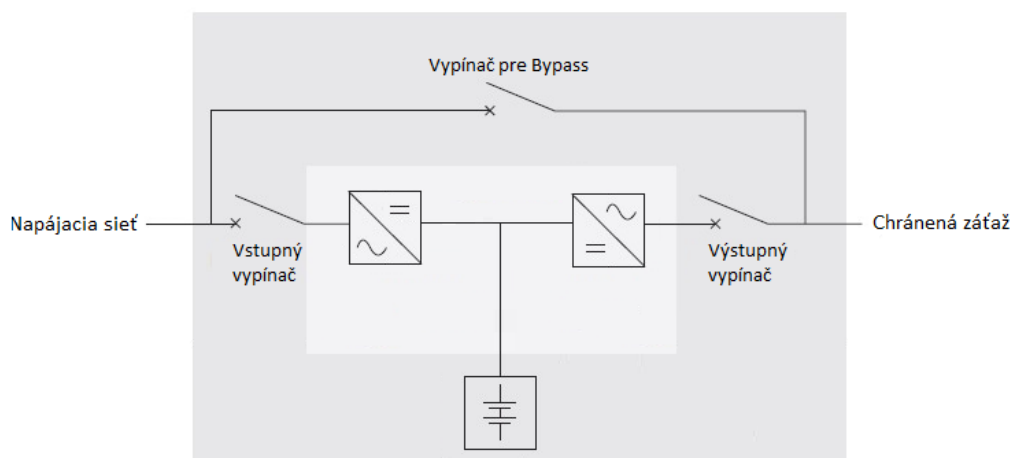
### On-line UPS

V normálnom režime, kedy je sieťové napätie v daných tolerančných medziach, dodáva usmerňovač energiu zo siete do jednosmerného medziobvodu, z ktorého je napájaný invertor vytvárajúci striedavé napätie pro chránenú záťaž a ďalej je z neho v prípade potreby dobíjaná batéria.

V zálohovacom (batériovom) režime, kedy sú parametre sieťového napájania mimo požadované medze, je usmerňovač mimo prevádzku a energia pre napájanie invertora dodávajúceho výkon do chránenej záťaže je čerpaná z batérií.

V obtokovom režime (Bypass) - ak je inštalovaný - je sieťové napätie v tolerovaných medziach, avšak ak dôjde k poruche alebo preťaženiu jednotky UPS, je táto jednotka odpojená a záťaž je prepojená na napájanie z prevádzkovej alebo záložnej napájacej siete.

Charakteristikou tohto funkčného typu je jeho trvalá napäťová a frekvenčná nezávislosť výstupného napätia na sieťovom napájaní, s výnimkou obtokového režimu. Invertor je v trvalej prevádzke s plnou záťažou a normálnom stave prechádza energia zo siete dvoma premenami, AC/DC/AC (dvojitá konverzia) vid' Obr. 4-10. Prechod medzi sieťovým a batériovým režimom sa deje bez akýchkoľvek prepojovaní v silových obvodoch, tým pádom bez prechodových javov na výstupe. On-line UPS sú vhodné pre napájanie náročnejších spotrebičov s vysokými požiadavkami na kvalitu el. energie [29].



Obr. 4-10 Blokové schéma UPS on-line systému.

### Off-line UPS

Pasívne pohotovostná UPS v nominálnom sieťovom režime, kedy sieťové napätie je v daných tolerančných medziach, je záťaž napájaná zo siete, čiže cez obtok (bypass). Napätie siete môže byť upravené prispôbovacím členom (odbočkový transformátor atď.) s cieľom rozšírenia tolerančných medzí. Invertor je v normálnom režime mimo prevádzku.

V zálohovacom režime, kedy parametre sieťového napájania sú mimo tolerované medze, je invertor aktivovaný a po odpojení sieťového vstupu začne napájať chránenú záťaž energiou z batérie.

Charakteristickou črtou tohto typu UPS je napäťová a frekvenčná nezávislosť výstupu iba v zálohovacom režime, v sieťovom režime je výstup jednotlivých zdrojov tohto funkčného typu napájaný sieťovým napätím a frekvenciou. Vzhľadom k potrebným manipuláciám pre prechod zo

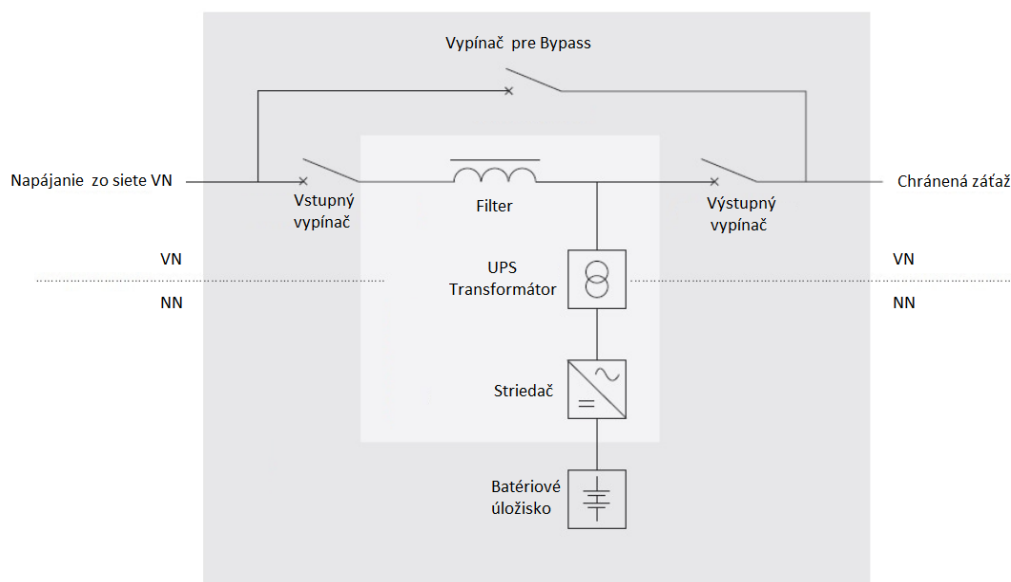
sieťového do batériového režimu vznikajú prechodové javy s dočasnou stratou výstupného napätia. Pasívne pohotovostné UPS patrí medzi lacnejšie a jednoduchšie záložné zdroje, tento typ je možné použiť pre zálohovanie nie príliš náročných spotrebičov z dôvodu opätovného nadobudnutia prevádzkovej hodnoty napätia až v desiatkach milisekúnd, čo by mohlo mať v prípade technológií citlivých na kvalitu napätia výrazne negatívny dopad [27][29].

### Line-interactive UPS

Sieťovo interaktívna UPS v normálnom sieťovom režime, kedy je sieťové napájanie v tolerovaných medziach, je záťaž napájaná zo siete. Napätie siete je upravované sieťovým prispôsobovacím členom (line interface). Docieli sa tak rozšírenie medzí sieťového napätia pre sieťový režim UPS. Invertor je v tomto režime v prevádzke synchronizovaný so sieťou, avšak buď v stave na prázdno alebo sa aktívne podieľa istým dielčím výkonom na úprave sieťového napätia.

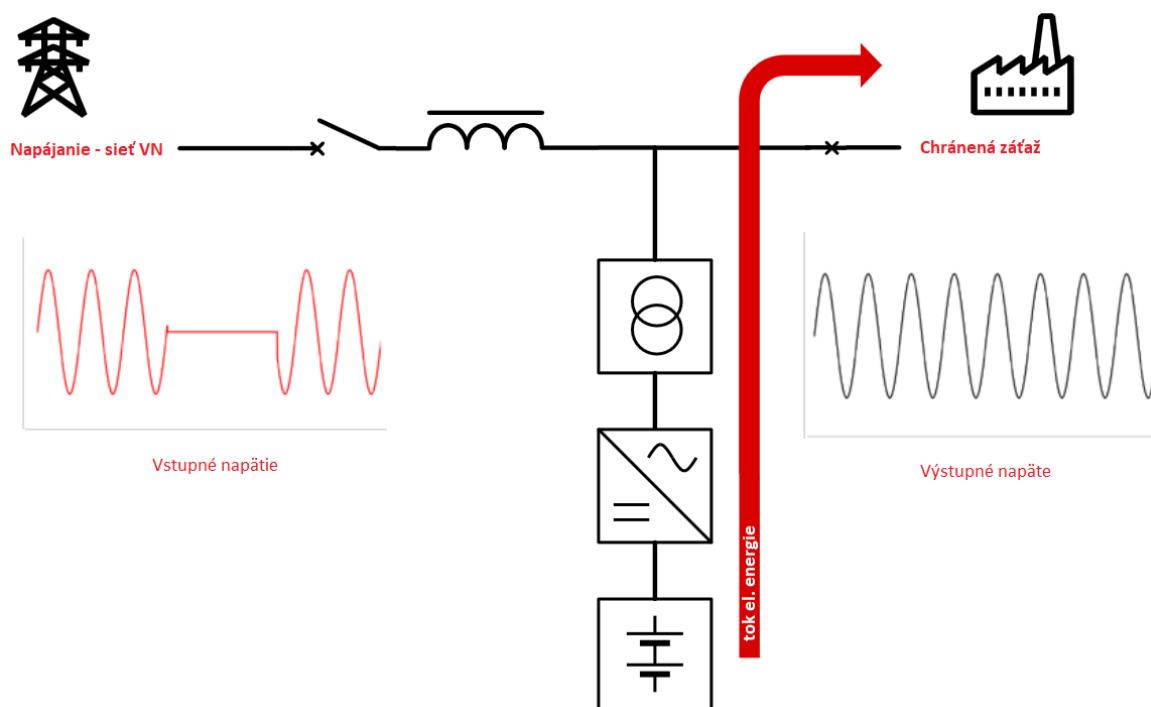
V zálohovacom režime sa energia potrebná pre napájanie záťaže čerpá plne z batériového úložiska. Taktiež môže byť inštalovaný obtokový systém s obdobnou funkčnosťou ako u on-line UPS systémov.

Do tohto definovaného funkčného typu UPS je možné zaradiť širokú skupinu zdrojov neprerušovaného napájania. Na jednej strane sem patria jednoduché zdroje s veľmi hrubou reguláciou vstupného napätia transformátorom s niekoľkými odbočkami a so spínačovým prechodom medzi sieťovým a batériovým napájaním, čiže zdroje, ktorých vlastnosti sa príliš nelíšia od najjednoduchších off-line UPS systémov. Naproti tomu je sem nutné zahrnúť aj zdroje s plynulým a presným riadením výstupného napätia a plynulým prechodom medzi sieťovým a batériovým režimom typ s jednou premenou (single conversion) alebo tzv. Delta konverziou, ktorých vlastnosti sú veľmi podobné on-line UPS systémom [29].



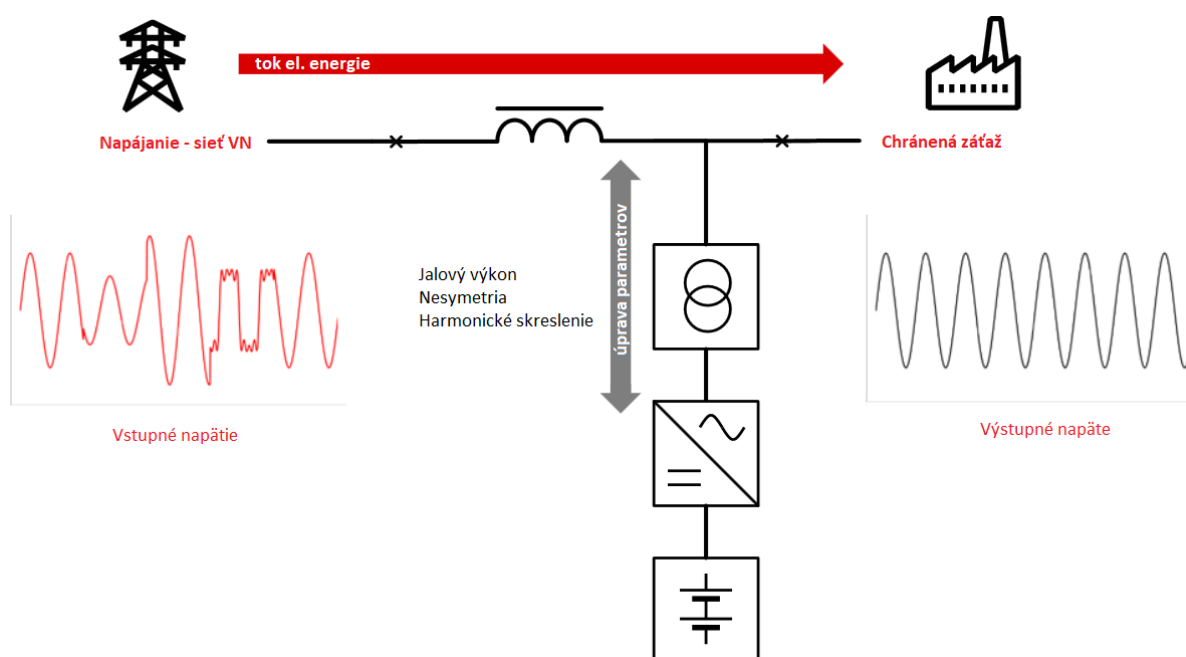
Obr. 4-11 Blokové schéma line-interactive UPS systému. [27]

Systém UPS umožňuje ako funkciu záložného zdroja, kedy preberá plnú záťaž na niekoľko sekúnd/minút do doby nábehu stabilnejšieho záložného zdroja (diesel-generátoru) vid'. Obr. 4-12.



Obr. 4-12 Funkcia UPS systému ako záložného zdroja – upravené autorom. [27]

Systém UPS môže taktiež fungovať aktívne pre úpravu parametrov kvality dodávky el. energie vid'. Obr. 4-13, ktorá je veľmi dôležitá pre niektoré priemyselné objekty.



Obr. 4-13 Funkcia UPS systému pre úpravu parametrov kvality el. energie – upravené autorom. [27]

Základným problémom pre výber UPS, je špecifikácia prevádzkových požiadaviek zákazníkom a ich porovnanie s parametrami dostupných UPS systémov. Táto časť práce má za úlohu oboznámiť čitateľa so základnými princípmi technológie UPS, podrobnejšie informácie môže čitateľ nájsť v nasledujúcich normách [29]:

1. IEC 62040-3:1999 Uninterruptible power systems (UPS) – Part 3: Method of specifying the performance and test requirements.
2. ČSN EN 50160 (33 0122):2000 Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejné distribuční sítě.
3. ČSN EN 50091-1-1 (36 9065): 1998 Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) – Část 1-1: Všeobecné a bezpečnostní požadavky pro UPS používané v prostorách přístupných obsluze.
4. ČSN EN 50091-1-2 (36 9065): 1999 Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) – Část 1-2: Všeobecné a bezpečnostní požadavky pro UPS používané v prostorách s omezeným přístupem.
5. ČSN EN 50091-2 (36 9065):1997 Zdroje nepřerušovaného napájení (UPS) – Část 2: Požadavky EMC.

## 5 MODEL BATÉRIOVEJ APLIKÁCIE PEAK-SHAVING

V tejto kapitole bude popísaný spôsob vytvorenia simulačného modelu pre možnosť vyhodnotenia aplikácie peak-shaving pre priemyselný objekt resp. veľkoodberateľa elektrickej energie na základe meraných dát s použitím batérového úložiska na báze Li-ion.

### 5.1 Popis simulačného modelu

Simulačný model pre vyhodnotenie nasadenia aplikácie peak-shaving bol vytvorený vo výpočtovom prostredí Matlab pomocou zápisu zdrojového kódu. Tento spôsob vytvorenia modelu bol vybraný z dôvodu priblíženia sa klasickým programovacím jazykom, ktoré môžu v budúcnosti slúžiť pre vytvorenie obdobného modelu pomocou softvérovej aplikácie. Ďalším dôvodom pre výber daného spôsobu vytvorenia vyhodnocujúceho modelu boli možné rýchle zmeny a úpravy v rámci zdrojového kódu.

Vytvorený program pozostáva z dvoch hlavných častí a to technickej časti, kedy sa sleduje správanie batérie a invertora pre konkrétne vstupné dáta a ekonomickej časti, ktorá vyhodnocuje nasadenie aplikácie peak-shaving pre konkrétny objekt za konkrétnych ekonomických vstupov.

Výstupy z navrhnutého simulačného modelu sú prezentované v číselnej a grafickej forme z dôvodu zlepšenia predstavy fungovania batérie na základe konkrétnych vstupov zadávaných užívateľom.

#### 5.1.1 Vstupy pre výpočet

##### 5.1.1.1 Spotreba el. energie objektu

Základným vstupom do navrhnutého programu sú namerané hodnoty odoberaného výkonu veľkoodberateľa el. energie, ktoré nemusia byť merané priamo samotným prevádzkovateľom objektu, ale môžu byť poskytnuté na vyžiadanie prevádzkovateľa objektu distribútorom el. energie príslušného odberného miesta veľkoodberateľa. Tieto údaje musia byť uložené v súborovom formáte **xlsx**. (súbory formátu Microsoft Excel), v prípade nutnosti je tento súborový formát možné zmeniť. Pre čo najsprávnejšie vyhodnotenie nasadenia batérovej aplikácie peak-shaving je vhodné voliť merané dáta s minimálnym intervalom merania 15 minút a to z dôvodu možnosti vyhodnotenia dát, s ktorými oficiálne pracuje a vyhodnocuje distribútor el. energie.

##### 5.1.1.2 Časový interval merania

Časový interval merania vstupných dát dáva informáciu programu o tom s akými dátami musí pracovať (hodinové, štvrt' hodinové, minútové...). Tento vstupný údaj je veľmi dôležitý pre správnosť celého výpočtu či už v technickej alebo ekonomickej časti, a preto musí byť určený a zadáný správne.

##### 5.1.1.3 Rozsah časovej osi

Rozsah časovej osi sa určuje na základe vstupných meraných dát odoberaného výkonu objektu. Pre správne určenie časového rozsahu je nutné zadať dátum započatia merania a ukončenia merania a taktiež časový odstup (interval) medzi jednotlivými meraniami. Časová (dátumová) os je potrebná pre možnosť manipulácie s grafickými výstupmi a lepšiu prehľadnosť. Rozsah časovej osi môže taktiež slúžiť ako spätná kontrola pre zadaný interval merania. V prípade použitia korektných dát nastavenia časovej osi budú uložené matice časovej osi a odoberaných výkonov obsahovať rovnaký počet prvkov, čiže budú rovnakej dĺžky.

#### 5.1.1.4 Časové obdobie

Zadanie časového obdobia umožňuje výber medzi výpočtom z hodnôt mesačných alebo ročných. Táto vstupná podmienka sa používa primárne v rámci výpočtov, ktoré musia byť v závere premietnuté z výsledkov mesačných na ročné hodnoty.

#### 5.1.1.5 Priebeh výpočtu

Užívateľ má možnosť voľby medzi automatickým a manuálnym výpočtom. Manuálny výpočet prebehne na základe nastavených hodnôt kapacity batérie a výkonu invertora, ktoré užívateľ zadá a to aj v prípade, že toto riešenie nie je technicky alebo ekonomicky optimálne. Automatickým výpočtom umožní samostatný výpočet veľkosti kapacity batérie a veľkosti invertora, kedy sú rešpektované zvyšné nastavené vstupné hodnoty. Výsledkom automatického výpočtu sú teda kapacita batérie a výkon invertora s hodnotami, ktoré v rámci riešenej aplikácie peak-shaving dokážu plne pokryť výkonové špičky na základe vstupných historických dát.

#### 5.1.1.6 Rezerva batérie a invertora

V rámci automatického výpočtu môže užívateľ nastaviť hodnotu rezervy kapacity batérie a výkonu invertora v percentách, ktorá v rámci tohto spôsobu výpočtu bude prirátaná k najnižšej vyhovujúcej hodnote veľkosti kapacity batérie a výkonu invertora. Možnosť nastavenia rezervy základných prvkov batériového úložiska je dôležitý z hľadiska návrhu na základe historických dát.

#### 5.1.1.7 Vstupné údaje batériového úložiska

Inštalovaná kapacita batérie:

Kapacita batériového úložiska vyjadrená  $kWh$ , udáva koľko wattov energie dokáže dané úložisko dodať za jednu hodinu. Inštalovaná kapacita batériového úložiska je častokrát vyššia ako využiteľná kapacita batérie udávaná výrobcom. Niektorí výrobcovia udávajú túto hodnotu ako pomer využiteľnej kapacity batérie k jej inštalovanej kapacite. Výpočtový program pracuje práve s hodnotou inštalovanej kapacity batérie, ktorú následne upravuje podľa ďalších zadaných parametrov.

Hodnota nabitia batérie :

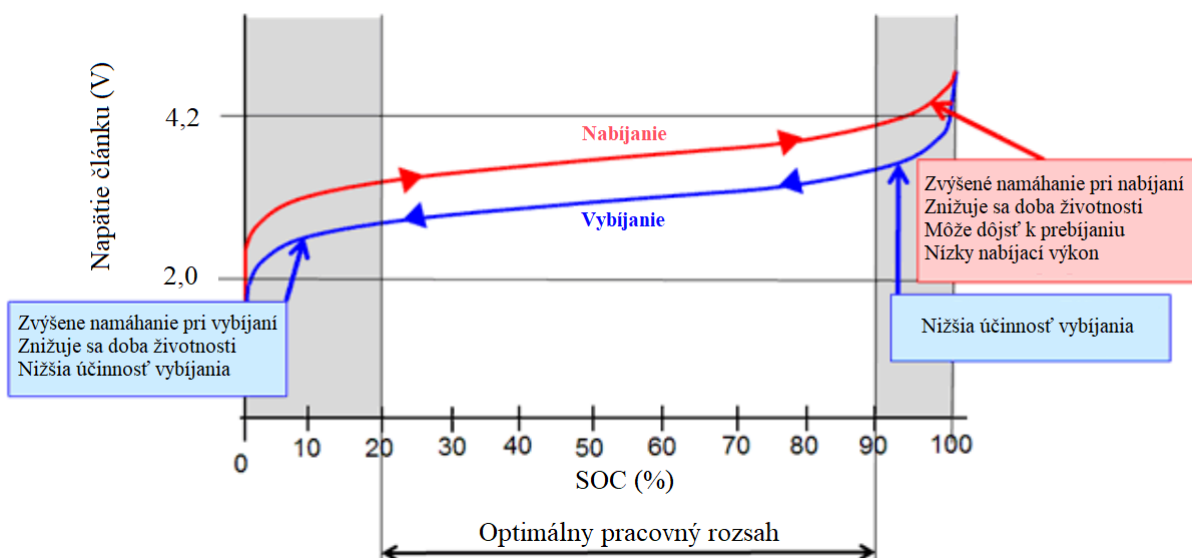
Hodnota nabitia batérie alebo zaužívané označenie SoC (State of Charge) popisujú pomer energie uloženej v batériovom úložisku k celkovej využiteľnej kapacite úložiska. Výsledkom je percentuálna hodnota, ktorá vypovedá o tom v akom stave nabitia je batériové úložisko v sledovaný moment.

Program požaduje tri vstupné hodnoty v rámci SoC a to:

1. Počiatočnú hodnotu nabitia
2. Maximálnu hodnotu nabitia
3. Minimálnu hodnotu nabitia

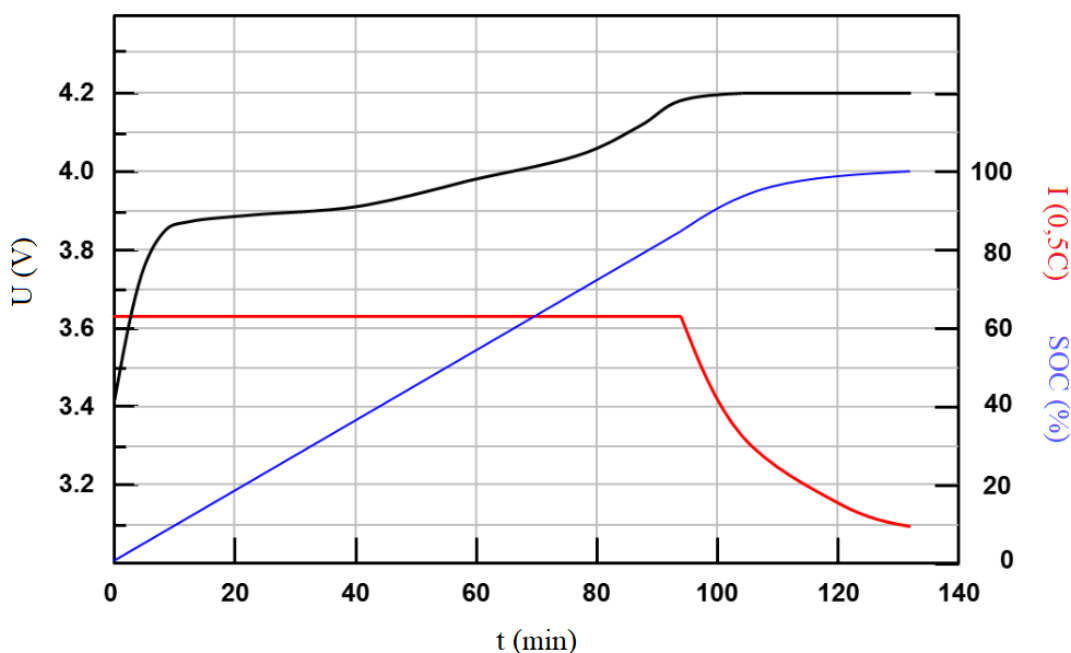
Nastavenie optimálneho využitia batérie, čiže nastavenie minimálnej a maximálnej hodnoty nabitia udáva výrobca. V rámci programu sú definované hodnoty maximálnej hodnoty nabitia (90 %) a minimálnej hodnoty nabitia (10 %), tieto nastavené hodnoty v sebe obsahujú hodnoty prídavných strát batérie a invertora.





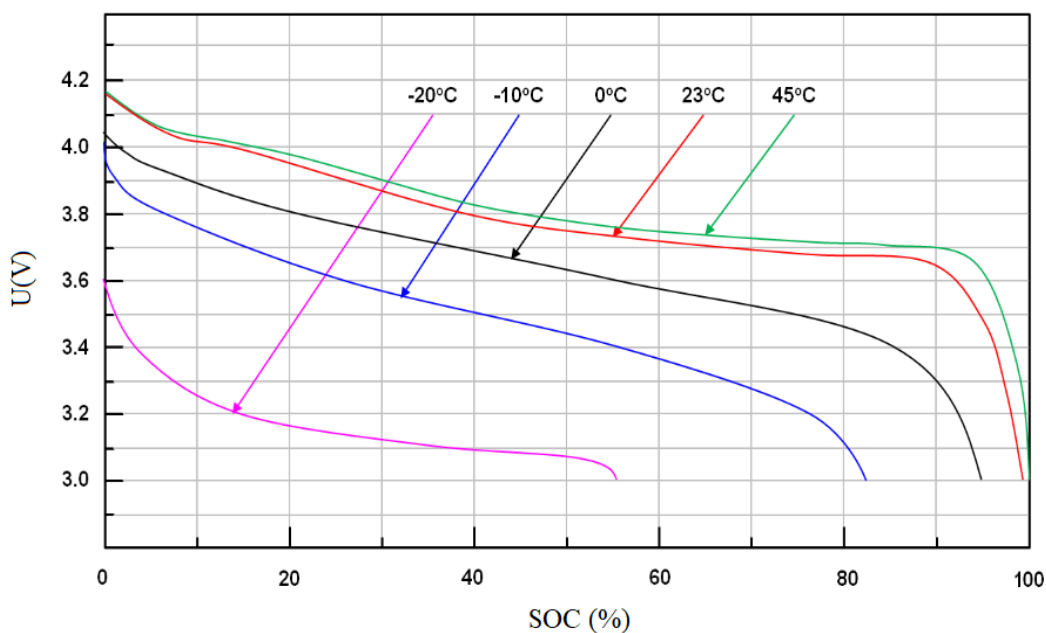
Obr. 5-1 Optimálny pracovný rozsah SoC Li-B – upravené autorom. [30]

Ďalším dôvodom zvoleného pracovného rozsahu batérie (90-10 % SoC) je charakteristika batérie, ktorá je pre potreby tohto výpočtového programu idealizovaná. V rozsahu 90-10 % SoC môžeme povedať, že napäťová a prúdová charakteristika batérie na báze Li-ion je takmer konštantná vid'. Obr. 5-2. Avšak toto tvrdenie bude platiť iba pokiaľ bude zabezpečené nabíjanie resp. vybíjanie pri prúdovom súčiniteli (C-rate) udávanom výrobcom ako optimálny (väčšinou do 1C) vid'. Obr. 5-4 [30][32].



Obr. 5-2 Nabíjacia charakteristika Li-B – upravené autorom [31].

Ďalšou podmienkou možnosti vytvorenia idealizovanej charakteristiky je zabezpečenie optimálnej teploty prevádzky podľa odporúčaní výrobcu v priestoroch, kde bude dané batériové úložisko inštalované. Zabezpečenie optimálnej prevádzkovej teploty batériového úložiska znamená dobre odvetrané priestory, aby nedošlo k prehrievaniu, resp. zvyšovaniu teploty článkov a taktiež zabezpečiť, aby nedochádzalo k veľkým poklesom teploty z dôvodu tlmenia chemickej reakcie vid'. Obr. 5-3 [33].

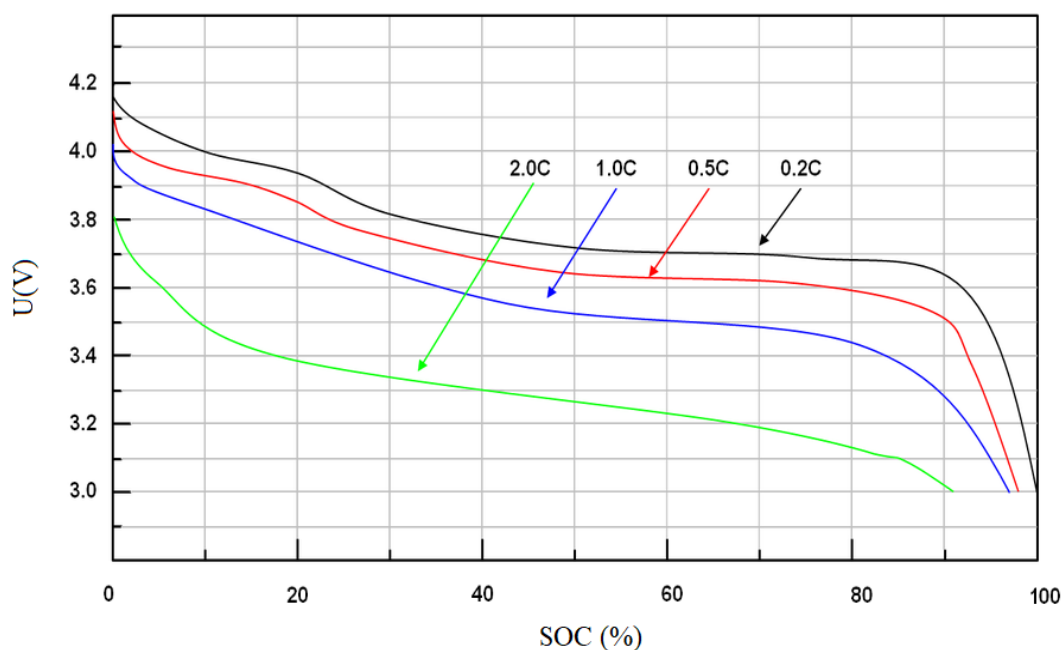


Obr. 5-3 Závislosť napätia Li-B na SOC pre rozdielne teploty, pre C- rate 1 – upravené autorom. [31]

Zmena maximálnej alebo minimálnej hodnoty nabíjania sa odporúča hlavne v prípade, že užívateľ chce vyčleniť časť kapacity batérovej úložiska pre inú aplikáciu mimo peak-shaving.

#### C-rate batérie:

Prúdový súčiniteľ C-rate (Current Rate) je hodnota vyjadrujúca menovitý prúd článku alebo batérie. Vybíjanie batérie hodnotou 1C pri ideálnych podmienkach poskytne nominálnu menovitú kapacitu behom jednej hodiny. Nabíjacie a vybíjacie prúdy sú udávané ako násobky alebo zlomky nominálnej hodnoty menovitého prúdu C [33].



Obr. 5-4 Závislosť napätia Li-B na SOC pre rozdielny C-rate, pri 20°C – upravené autorom [31].

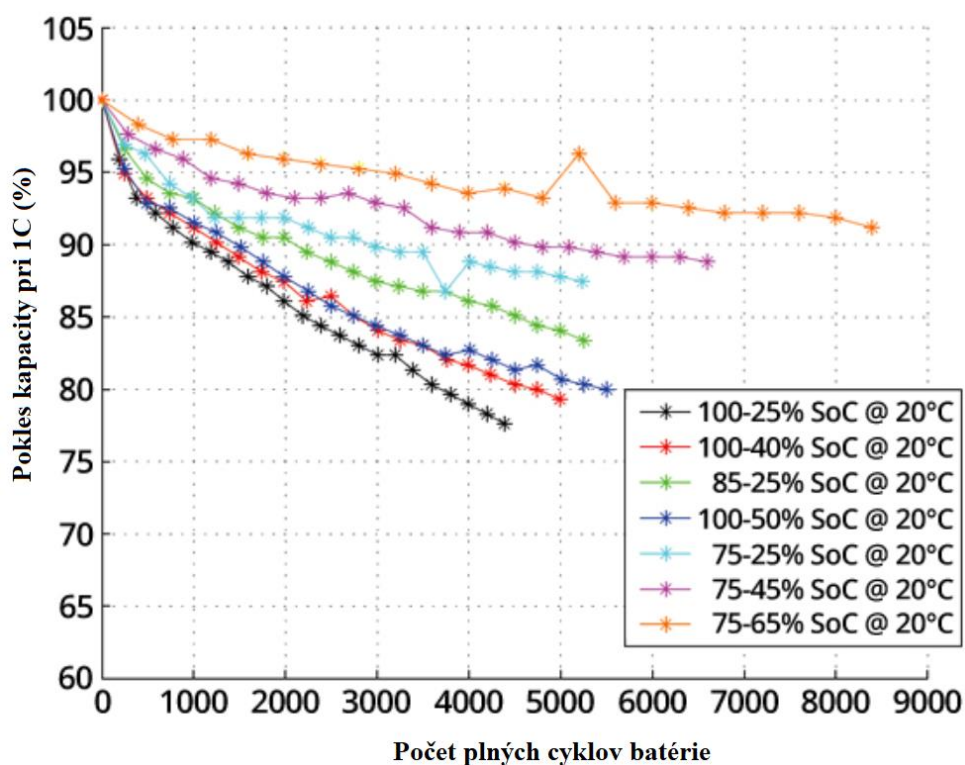
Na Obr. 5-4 môžeme pozorovať krivku vybíjacieho napätia Li-ion batérie pri rôznych úrovniach vybíjacieho prúdu s konštantným priebehom počas celej doby vybíjania. Z grafu je zrejmé, že pri nižších vybíjajúcich prúdoch (menšej záťaži) je batéria schopná dodať viac energie pred dosiahnutím úplného vybitia na 3 V a to z dôvodu znížených vnútorných strát batérie [33].

#### Maximálny počet cyklov:

Maximálny počet cyklov (cycles life) stanovuje počet plných cyklov, ktoré môžu byť z batériového úložiska dodané kým neskončí jeho životnosť, podľa stanovených podmienok prevádzky. Maximálny počet cyklov životnosti batérie udáva výrobca pri istých podmienkach prevádzky.

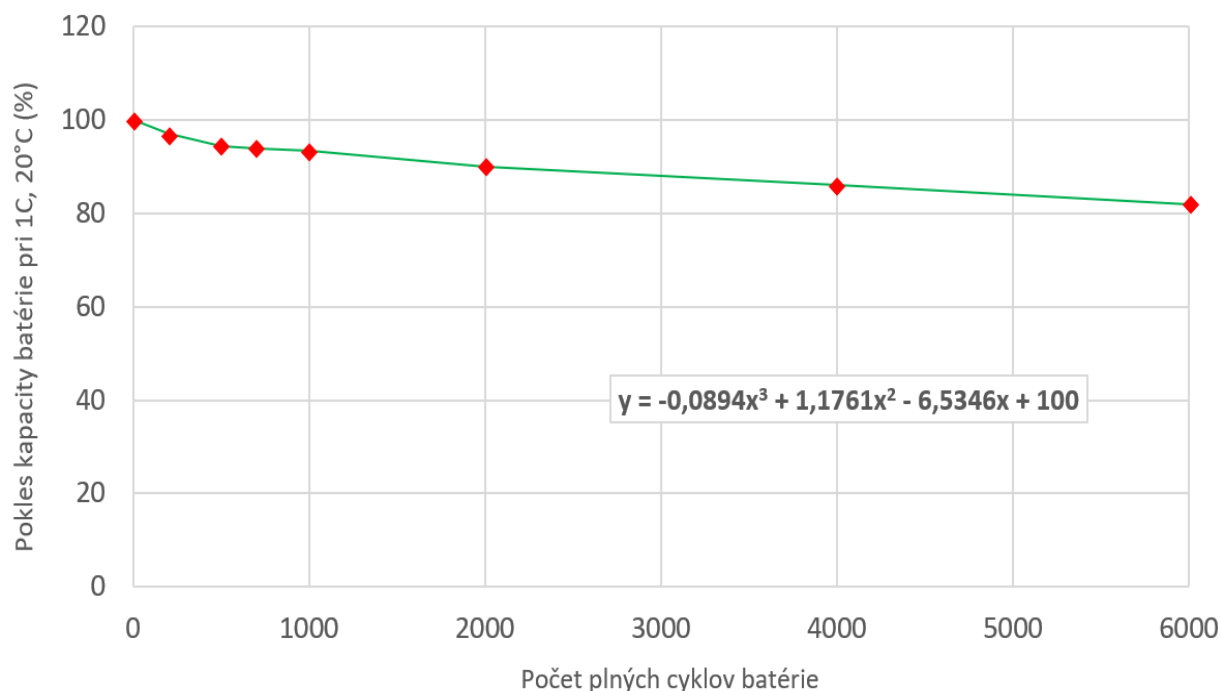
V spojitosti s maximálnym počtom cyklov životnosti batérie sa uvádza taktiež pokles kapacity v závislosti na počte cyklov, čo je spôsobené degradáciou materiálov a postupným zvyšovaním impedancie batérie. Stanovenie poklesu kapacity za dobu životnosti batérie, resp. dobu životnosti projektu je dôležité z hľadiska dimenzovania batériového úložiska pre konkrétnu aplikáciu. Postupné znižovanie kapacity batérie môže zapríčiniť, že po určitom množstve cyklov kapacita batérie nebude schopná plne spĺňať účel ku ktorému bola využitá, ako napríklad pokrývanie výkonových špičiek v aplikácií peak-shaving [32][33].

Strmosť poklesu kapacity batérie v závislosti na počte cyklov závisí hlavne od SoC, v ktorom batéria pracuje, prevádzkovej teploty batérie, maximálnom C-rate s ktorým je batéria prevádzkovaná vid' Obr. 5-5.



Obr. 5-5 Pokles kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov [32]

Na základe Obr. 5-5 bola určená krivka, ktorá bude reprezentovať pokles kapacity batérie v aplikácii peak-shaving vid' Obr. 5-6, táto krivka bola prispôbená základnému využívaniu batérie (90-10 %) pre túto aplikáciu tak, aby došlo čo k najviac optimálnemu využitiu batérie a aby nedochádzalo k rýchlemu znižovaniu jej životnosti vid' Obr. 5-1 [32].



Obr. 5-6 Trendová krivka poklesu kapacity Li-B v závislosti na počte plných cyklov

Vytvorená krivka Obr. 5-6 zobrazuje rovnicu trendu poklesu kapacity batérie, ktorá bude neskôr využitá pri výpočte programu, aby mohol byť stanovený pokles kapacity batérie na konci životnosti projektu.

#### Výkon batérie:

Výkon batérie je okamžitá hodnota, ktorú batéria dodáva do záťaže. Výkon batérie je možné použiť C-rate resp. E-rate (energy rate) batérie, ktorý hovorí o tom akým výkonom sa batéria vybíja alebo nabíja. Vybíjanie batérie hodnotou 1 E pri ideálnych podmienkach poskytne nominálnu menovitú kapacitu behom jednej hodiny. Preto je možné uvažovať nominálny (žiadaný) C-rate ako E-rate. Maximálny výkon batérie môže byť pomerne vysoký, avšak nabíjanie alebo vybíjanie veľkými výkonmi má za následok rýchle starnutie batérie, preto sa optimálny vybíjací a nabíjací prúd resp. výkon pohybuje v rozmedzí 0,3 až 1 C (E) [33][34].

#### Účinnosť batérie:

Vyjadruje pomer medzi výstupnou (kWh) a vstupnou energiou (kWh) batériového úložiska behom jedného cyklu. V rámci batériových technológií sa uvažujú DC/DC účinnosti. Účinnosť Li-ion technológie batérií sa pohybuje v rozmedzí 90-97 %, táto hodnota sa mení v závislosti na použitých materiáloch, prevádzkovaní batérie atď. Účinnosti udávané výrobcami batérií sú merané pri laboratórnych podmienkach, čiže pri optimálnej teplote a prevádzke batérie [5].

#### Maximálny výkon invertora:

V rámci voľby invertora je nutné poznať nominálnu resp. maximálnu hodnotu výkonu invertora, pri ktorej dokáže inverter pracovať po celú dobu bez toho, aby došlo k jeho poškodeniu alebo obmedzeniu dodávky el. energie do záťaže. Taktiež je nutné brať ohľad na to, že niektorí výrobcovia uvádzajú zdanlivý výkon inverterov v kVA, avšak pre správny výpočet v navrhovanom programe je nutné zadávať hodnotu činného výkonu v kW [35].

Pre optimálny technicko-ekonomický návrh je taktiež potrebné poznať maximálne preťaženie invertora, s ktorým môže inverter fungovať istý čas radovo v sekundách až minútach. V prípade, že je dobre známy priebeh spotreby a výkonových špičiek odberu skúmaného objektu na základe tohto poznatku je možné znížiť celkový výkon invertora, ktorého výkon nebude musieť pokrývať ojedinelé vysoké výkonové špičky svojím nominálnym výkonom, ale pre ich pokrytie použije možný čas výkonového preťaženia [35].

#### Účinnosť invertora:

Účinnosť invertora podobne ako u batérií vyjadruje pomer medzi vstupnou a výstupnou energiou použitého invertora. Účinnosť invertora musí byť stanovená výrobcom zariadenia.

#### **5.1.1.8 Rezervovaná kapacita**

Rezervovanou kapacitou (RK) sa rozumie zmluvný maximálny štvrťhodinový výkon v odbernom mieste zákazníka alebo výrobcu druhej kategórie alebo zmluvný maximálny výkon v predajnom mieste lokálnej distribučnej sústavy alebo zmluvný štvrťhodinový výkon v súhrne za predajné miesta medzi prevádzkovateľmi regionálnych distribučných sústav uvedený v zmluve o zaistení služby distribučnej sústavy, alebo v zmluve o združených službách dodavok elektrickej energie.

Rezervovaná kapacita sa zjednáva zvlášť pre každé odberné miesto zákazníka (odberateľa el. energie) alebo predajné miesto výroby alebo distribučnej sústavy samostatne pre napätie medzi fázami.

- a) Vyšším než 52 kV,
- b) od 1 kV do 52 kV vrátane a
- c) do 1 kV vrátane.

V rámci odberného alebo predajného miesta na hladine vysokého a veľmi vysokého napätia účtuje prevádzkovateľ distribučnej sústavy platbu za rezerváciu kapacity vo výške súčinu štvrťhodinového maximálneho odoberaného výkonu v danom období a ceny rezervovanej kapacity v danom mesiaci. Pre odberné alebo predajné miesta na napäťovej hladine nízkeho napätia účtuje prevádzkovateľ distribučnej sústavy platbu za rezerváciu kapacity podľa prúdovej hodnoty hlavného istiaceho prvku pred elektromerom v danom období a zmluvne dohodnutej sadzby za zaistenie distribúcie elektriny [36][37].

#### Ročná rezervovaná kapacita:

Ročnou rezervovanou kapacitou (RRK) sa rozumie zmluvný maximálny štvrťhodinový výkon pripadajúci na odberné miesto resp. na predajné miesto elektrickej energie, ktorý bol zmluvne dohodnutý s dodávateľom el. energie, ktorý túto hodnotu nahlási distribútorovi el. energie. Ročná rezervovaná kapacita je uplatňovaná na celý kalendárny rok. Ak došlo v odbernom mieste alebo predajnom mieste k zvýšeniu ročnej rezervovanej kapacity v priebehu kalendárneho roka, účtuje sa platba za zvýšenú kapacitu od začiatku kalendárneho mesiaca, pre ktorý bolo toto navýšenie ročnej rezervovanej kapacity uplatnené. Ročnú rezervovanú kapacitu je možné v odbernom mieste alebo predajnom mieste znížiť až po uplynutí doby 12 mesiacov od poslednej zmeny. Ročnú rezervovanú kapacitu je možné kombinovať s mesačnou rezervovanou kapacitou [38].

#### Mesačná rezervovaná kapacita:

Mesačná rezervovaná kapacita (MRK) sa rozumie zmluvný maximálny štvrťhodinový výkon pripadajúci na odberné miesto resp. na predajné miesto elektrickej energie, ktorý bol zmluvne dohodnutý v zmluve s dodávateľom el. energie, ktorý túto hodnotu nahlási distribútorovi el.

energie. Mesačná rezervovaná kapacita môže, ale nemusí byť dopredu zjednaná v zmluve s dodávateľom el. energie na jednotlivé mesiace od hodnoty 0 do hodnoty rezervovaného príkonu ( $RRK + MRK \leq RP$ ). Mesačnú rezervovanú kapacitu je možné podľa potreby navýšiť napr. podľa zákazkovej náplne zákazníka alebo využitia technológie a tým pádom podľa predpokladaného zaťaženia siete. Ak došlo v odbernom mieste alebo predajnom mieste k zvýšeniu mesačnej rezervovanej kapacity v priebehu kalendárneho mesiaca, účtuje sa platba za zvýšenú kapacitu od začiatku kalendárneho mesiaca, pre ktorý bolo toto navýšenie mesačnej rezervovanej kapacity uplatnené [38].

#### Rezervovaný príkon:

Rezervovaným príkonom sa rozumie:

1. hodnota elektrického príkonu v mieste pripojenia k prenosovej sústave v MW v základnom zapojení zjednaná s prevádzkovateľom prenosovej sústavy na základe požadovaného príkonu a technických parametrov zariadení prenosovej sústavy v mieste pripojenia k prenosovej sústave, alebo
2. hodnota max. elektrického príkonu zjednaná pri zriadení nového odberného alebo predajného miesta s prevádzkovateľom distribučnej sústavy na základe požadovaného príkonu v mieste pripojenia v MW na hladine veľmi vysokého alebo vysokého napätia alebo vo výške menovitej prúdovej hodnoty hlavného ističa pred elektromerom v A (Ampér-roch) v mieste pripojenia na hladinu nízkeho napätia. Hodnota môže byť po dohode s distribútorom navýšená (ak je na toto zaťaženie distribučná sústava dimenzovaná) až do maximálnej hodnoty technických parametrov zariadení distribučnej sústavy [36][37].

#### Štvrťhodinové výkonové maximum :

Štvrťhodinovým (technickým) maximom ( $\frac{1}{4}$  max) sa rozumie hodnota priemerného štvrťhodinového odoberaného elektrického príkonu na rozhraní odberného alebo predajného miesta. Táto hodnota je meraná distribútorom a je uvedená na faktúre od dodávateľa el. energie so záznamom presného času a dátumu nameranej hodnoty, ktorá sa následne vyhodnocuje z hľadiska nastavenej hodnoty celkovej rezervovanej kapacity v danom mesiaci ( $MRK + RRK$ ). V prípade, že nedôjde počas sledovaného mesiaca k prekročeniu nastavenej hodnoty rezervovanej kapacity nedochádza k penalizácii odberateľa. V prípade, že dôjde k prekročeniu zmluvne dohodnutej hodnoty rezervovanej kapacity v danom mesiaci odberateľ el. energie (zákazník) je finančne penalizovaný [37].

Tab. 5-1 Poplatky za rezervovanú kapacitu podľa napäťovej hladiny a distribučnej spoločnosti [38]

Prevádzkovateľ distribučnej sústavy	Hladina napätia	Mesačná cena za ročnú rezervovanú kapacitu v Kč/MW a mesiac	Mesačná cena za mesačnú rezervovanú kapacitu v Kč/MW a mesiac
ČEZ Distribuce, a. s.	VVN	71 304	79 382
	VN	171 705	191 158
E.ON Distribuce, a.s.	VVN	61 196	71 215
	VN	143 903	167 464
PREdistribuce, a.s.	VVN	77 872	87 640
	VN	193 631	217 919
LDS Sever, spol. s r.o.	VN	258 144	278 796
SV servisní, s.r.o.	VN	152 488	164 687

Pokiaľ dôjde k prekročeniu zmluvnej hodnoty RRK alebo RRK+MRK, je odberateľ povinný zaplatiť pokutu za prekročenie zmluvných hodnôt štvrťhodinového výkonového maxima. Cena za prekročenie rezervovanej kapacity v kalendárnom mesiaci je rovná štvornásobku pevnej mesačnej ceny za ročnú rezervovanú kapacitu, vzťahnutú na každý kW najväčšieho prekročenia stanovenej rezervovanej kapacity pre základný spôsob zapojenia odberného alebo predajného miesta štvrťhodinovým maximálnym odoberaným výkonom [38].

#### Vstupné hodnoty rezervovanej kapacity :

V rámci navrhovaného simulačného modelu pre optimalizáciu spotreby priemyselných objektov a veľkoodberateľov za pomoci aplikácie peak-shaving pomocou batériového úložiska sú zadávané vstupné hodnoty ročnej a mesačnej rezervovanej kapacity stávajúcej, ktorou vybraný objekt aktuálne disponuje a rezervovanej kapacity ročnej a mesačnej, ktorú chceme v danom objekte dosiahnuť.

#### Odkazy :

Táto časť práce má za úlohu oboznámiť čitateľa so základnými princípmi využitia rezervovanej kapacity, ďalšie informácie týkajúce sa rezervovanej kapacity, platieb za rezervovanú kapacitu a príkon môže čitateľ nájsť v nasledujúcich vyhláškach a cenovom rozhodnutí:

1. Vyhláška č. 16/2016 Sb. o podmínkách pripojení k elektrizačnej sústavě.
2. Vyhláška č. 408/2015 Sb. ze dne 23. prosince 2015 o Pravidlech trhu s elektřinou.
3. Cenové rozhodnutí ERÚ č. 6/2017 ze dne 21. listopadu 2017, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a další regulované ceny.

### **5.1.1.9 Ekonomické vstupy**

#### Diskontná sadzba :

Diskontná sadzba (požadovaná miera výnosnosti) sa vzťahuje na úrokovú mieru používanú pri analýze diskontovaných peňažných tokov na určenie súčasnej hodnoty budúcich peňažných tokov [39].

#### Životnosť projektu :

Doba životnosti projektu (LOP – life of the project) stanovuje dobu, počas ktorej je predmet projektu funkčný a udržiava si požadované vlastnosti. Doba životnosti projektu je dôležitý parameter potrebný pre výpočet ekonomickej návratnosti a celkových nákladov na predmet projektu. Projektom sa myslí investičná akcia, v tomto prípade nákup technológie a realizácia projektu batériovej aplikácie peak-shaving [40].

Životnosť projektu teda stanovuje predpokladanú dobu (väčšinou v rokoch), kedy predmet investície bude funkčne plniť svoj účel. Na konci životnosti projektu dôjde k oprave, renovácii alebo k zrušeniu predmetu investície [40].

#### Cena elektrickej energie :

Cena elektrickej energie stanovuje cenu elektrickej energie odberateľa vzťahnutú na 1 MWh spotrebovanej elektrickej energie v danom odbernom alebo predajnom mieste VN/VVN bez dane za elektrinu. Táto cena v sebe započítava nasledujúce poplatky:

- Cena silovej elektriny (cena za dodávku).
- Cena na úhradu nákladov spojených s podporou OZE.
- Cena OTE za činnosť zúčtovania.



- Cena za systémové služby.
- Cena za použitie sietí VN/VVN.

V cene elektrickej energie prevádzkovateľa odberného miesta vzťahnutej na 1 MWh spotreby elektrickej energie nie sú zahrnuté nasledujúce poplatky:

- Cena za ročnú/mesačnú rezervovanú kapacitu VN/VVN.
- Poplatok za prekročenie štvrt' hodinového maxima VN/VVN.
- Cenová prirážka za nedodržanie účinníku VN/VVN.
- Nevyžiadaná dodávka jalovej energie.
- Daň z elektriny.

Mesačný poplatok za rezervovanú kapacitu a poplatok za prekročenie štvrt' hodinového maxima budú figurovať vo výpočte ako samostatné hodnoty.

Poplatok za nedodržanie účinníku a za dodávku nevyžiadanej jalovej energie do ekonomického zhodnotenia batériovej aplikácie peak-shaving nevstupujú.

#### Cena za rezervovanú kapacitu:

Cena za ročnú alebo mesačnú rezervovanú kapacitu na výkonovej úrovni VN/VVN bude určená podľa Tab. 5-1, na základe vstupných parametrov, ktorými sú:

- Napäťová hladina odberného miesta.
- Prevádzkovateľ príslušnej distribučnej sústavy.
- Nastavená ročná/mesačná rezervovaná kapacita v MW.

#### Počiatočná investícia :

Počiatočná investícia (investičný náklad, kapitál) je množstvo financií potrebných k realizácii konkrétneho investičného projektu vynaložených na budúci ekonomický zisk.

V rámci spracovaného programu sa počiatočná investícia do batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving skladá z troch zložiek, ktoré sú vzťahnuté k jednotke výkonu invertora alebo kapacity batérie:

1. Investičný náklad na jednotku výkonu invertora Kč/kW.
2. Investičný náklad na jednotku kapacity batérie Kč/kWh.
3. Merná investícia vedľajších nákladov na jednotku kapacity batérie Kč/kWh.

Vyššie uvedené hodnoty sa odvíjajú od typu použitej technológie, ceny za inštaláciu, uvedenie do prevádzky, správu a nastavenie systému batériového úložiska.

## 5.1.2 Výpočet

### 5.1.2.1 Uvažované zjednodušenia výpočtu

Výpočty programu pre návrh batériového úložiska v aplikácii peak-shavingu sú idealizované, avšak poskytujú základnú predstavu o využití batériového úložiska v danej aplikácii. Základnými zjednodušujúcimi podmienkami v rámci výpočtu v porovnaní s reálnym modelom sú:

- Nabíjacia a vybíjacia charakteristika batérie, ktorá bola idealizovaná na základe pracovného rozsahu batérie 90-10 %.
- Teplotné vplyvy okolia, predpokladá sa uloženie batérií v prostredí so stálou optimálnou teplotou.

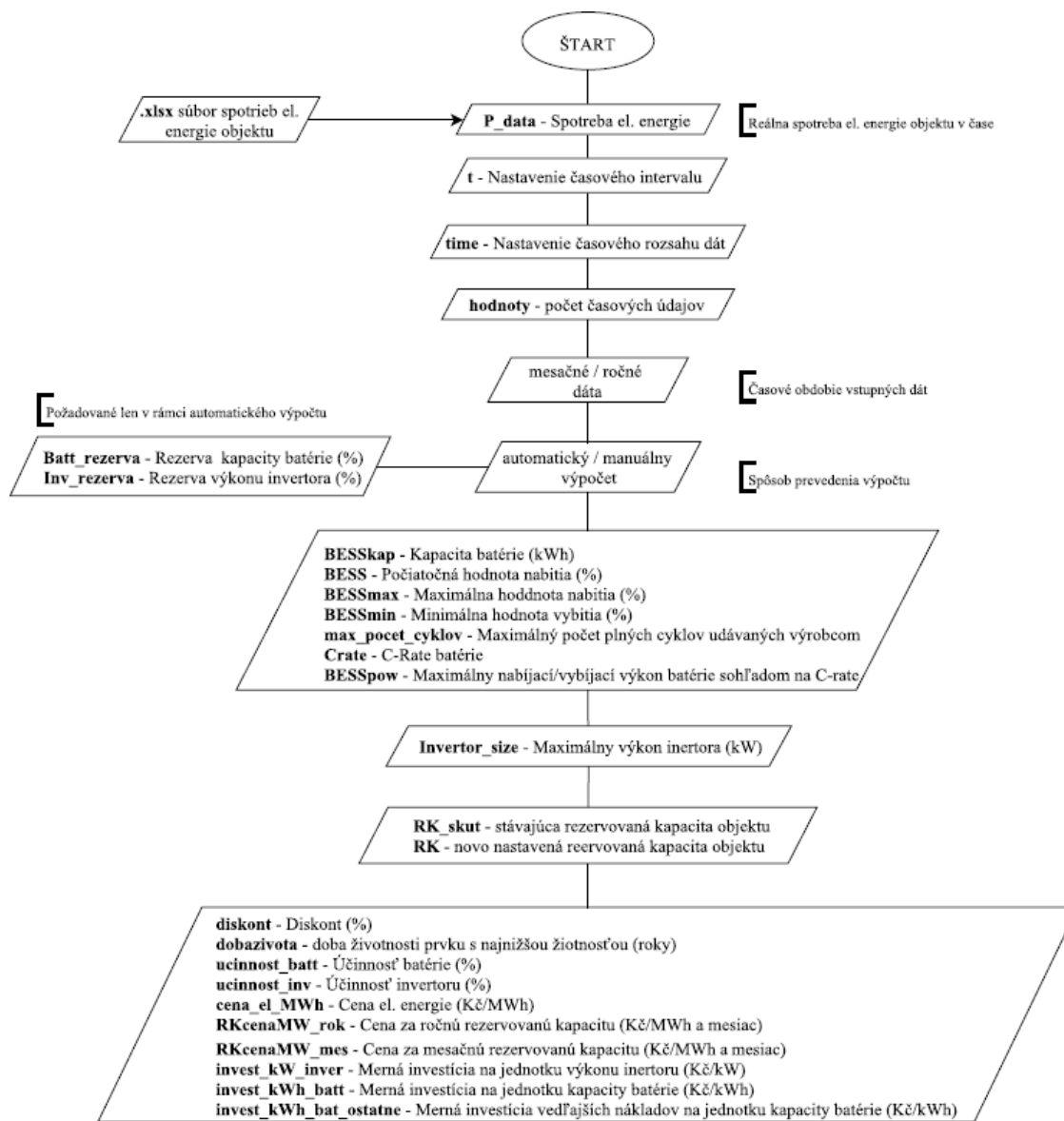


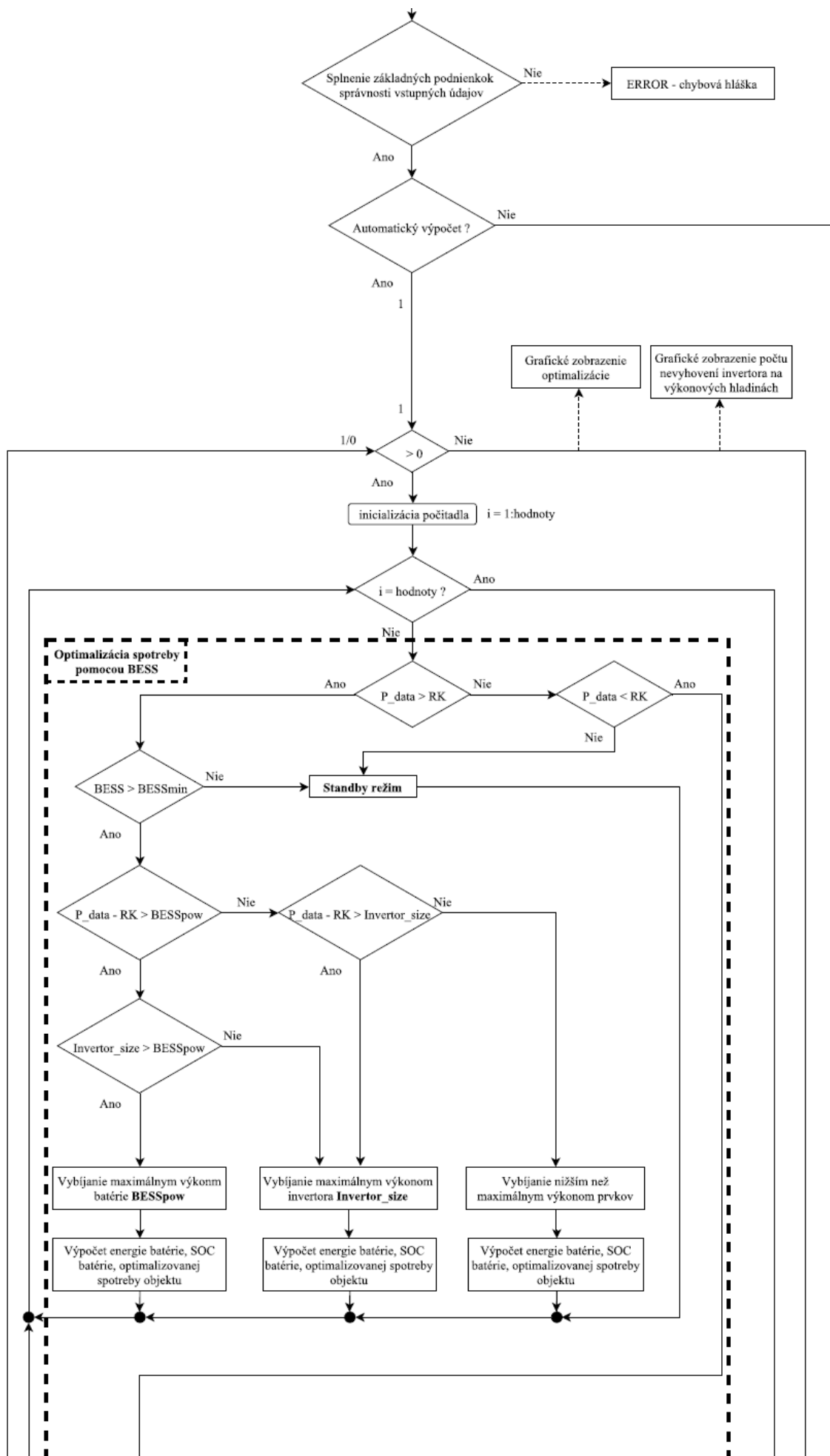
- Teplotný vplyv generovaný samotnou batériovou technológiou počas nabíjania alebo vybíjania.
- Reakčný čas batérie je zanedbaný.
- Idealizované statické a dynamické charakteristiky invertora.
- Neuvažuje sa odozva dátovej komunikácie vyhodnocujúcich a riadiacich prvkov systému.
- Prechodové javy pri regulácii nie sú v rámci výpočtu uvažované.

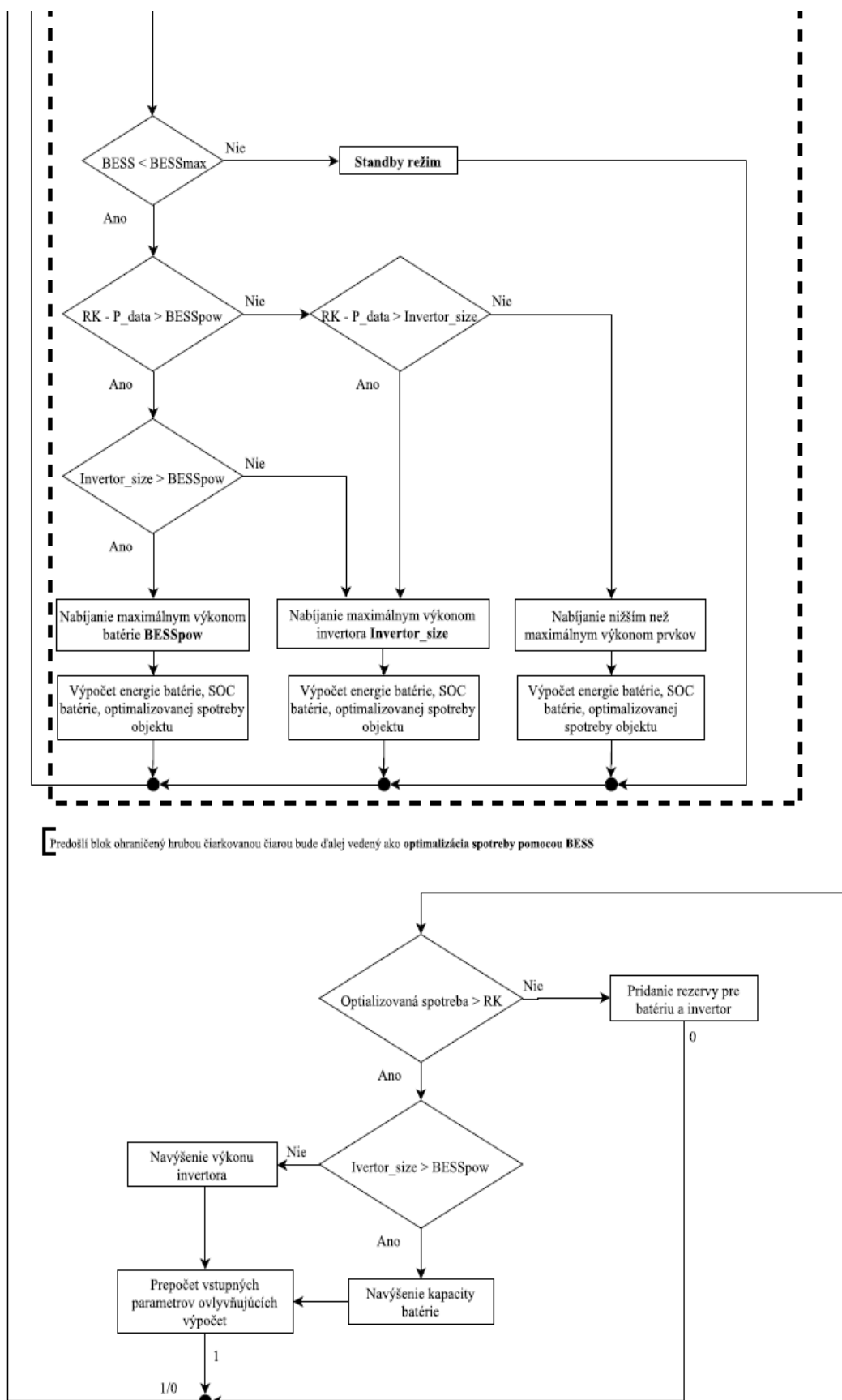
Ďalším zjednodušujúcim faktorom programu oproti reálnej aplikácii batériového úložiska je vyhodnocovanie na základe historických dát s ktorými môže program pracovať napr. pre štvrt' hodinové maximá, ktoré môžeme považovať za najdostupnejšie dáta s najmenším intervalom merania.

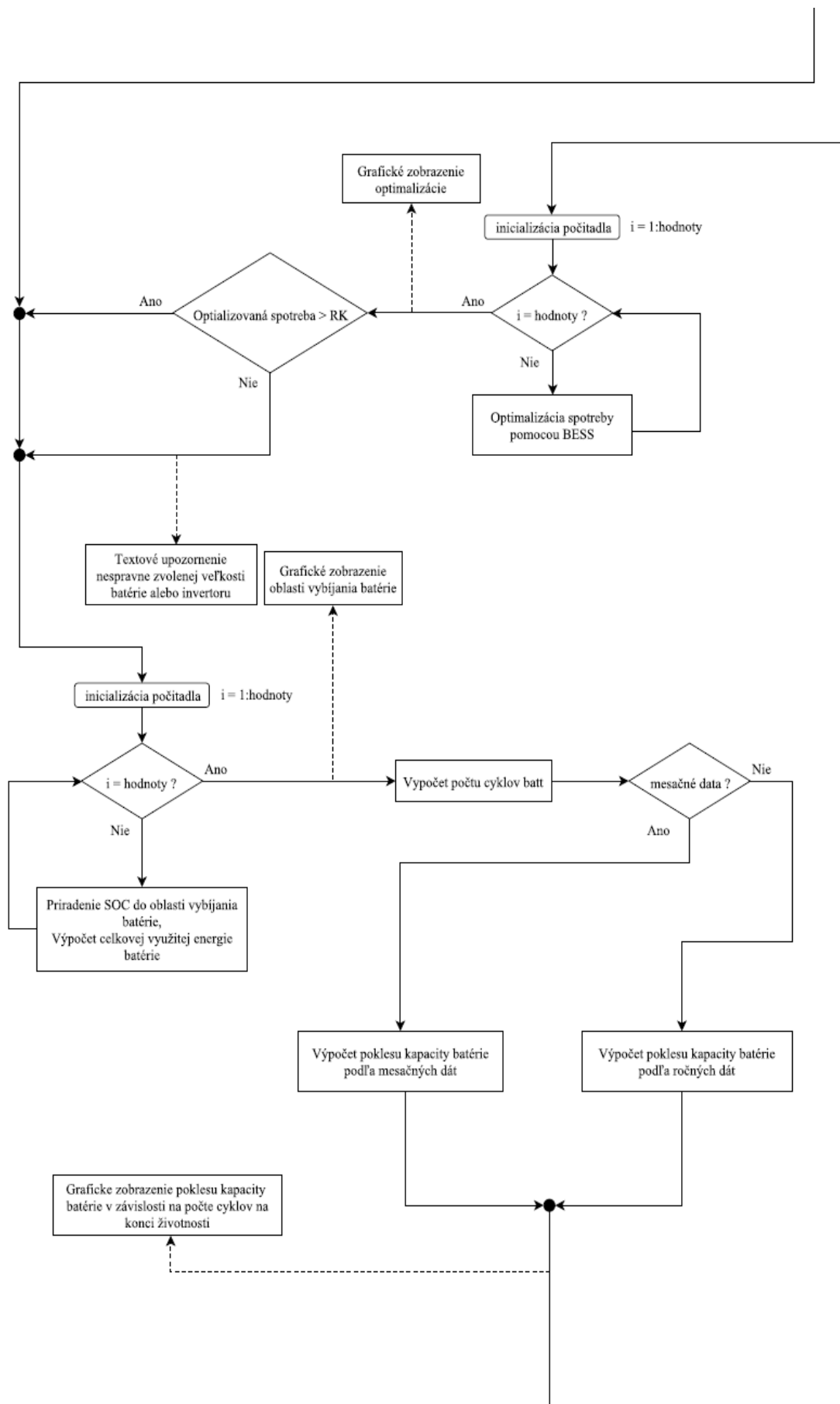
### 5.1.2.2 Vývojový diagram

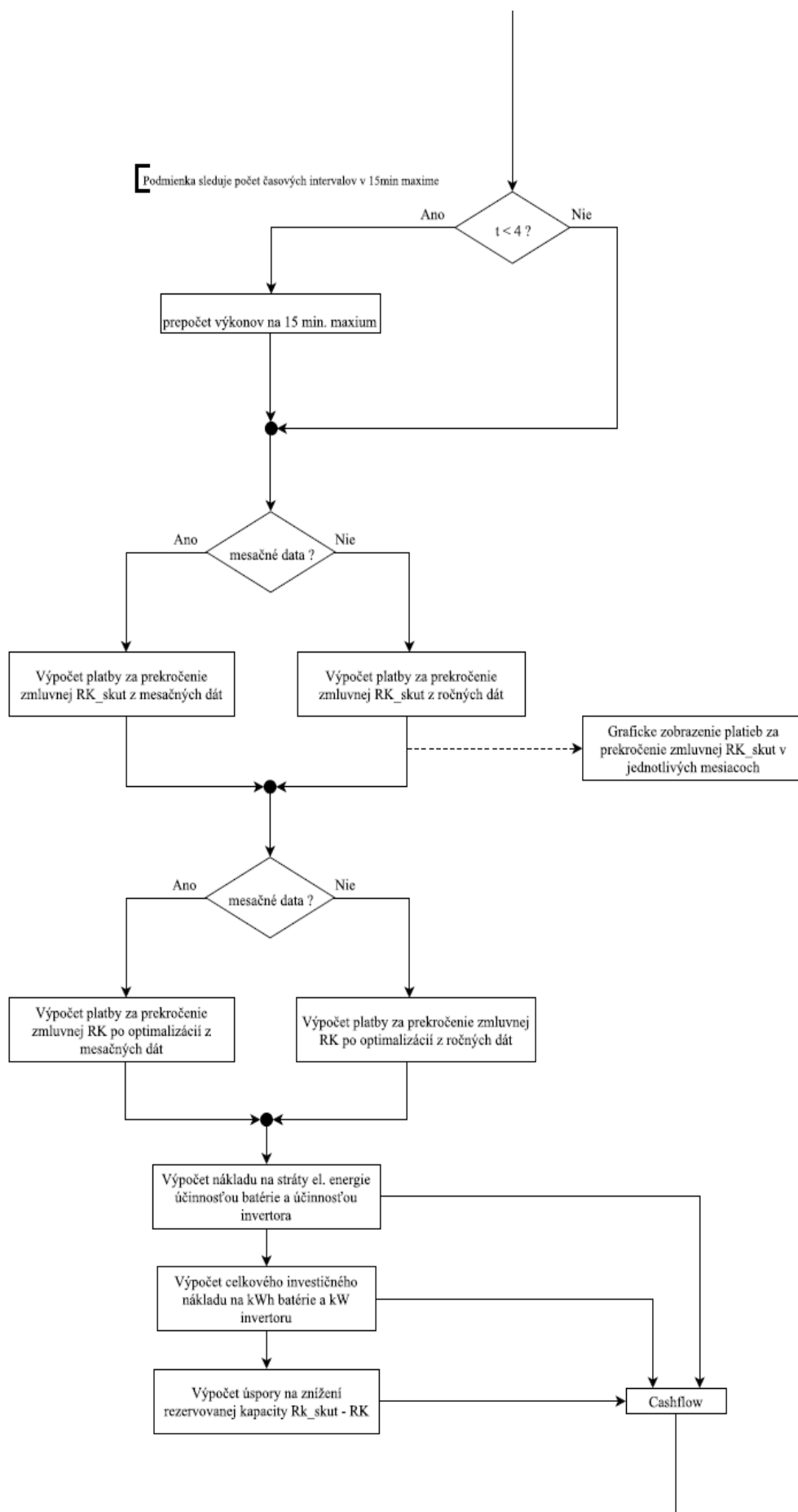
Nasledujúci vývojový diagram programu pre návrh batériovej aplikácie peak-shaving zjednodušene popisuje základnú programovú štruktúru a výpočtový mechanizmus, ktorý je v rámci programu uplatňovaný.

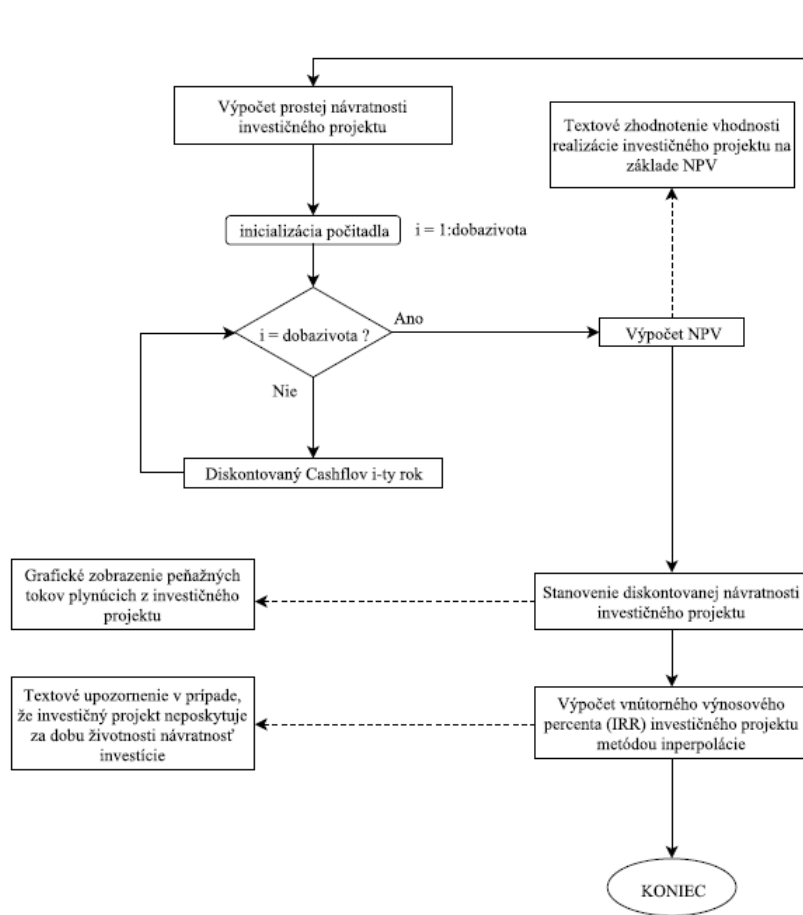












Vypracoval : Patrik Pinkoš  
3/2018

Obr. 5-7 Vývojový diagram programu batérovej aplikácie peak-shaving

Skript pre program Matlab je uvedený v prílohe A.

### 5.1.2.3 Výpočet hodnôt navrhovaného batérového systému

#### Výpočet maximálneho výkonu batérie :

Maximálny výkon batérie vychádza z maximálnej využiteľnej energie batérie a C-ratu.

$$P_{bat,max} = E_{bat,celk} \cdot C_{20} \quad (5.1)$$

#### Výpočet energie batérie :

V tomto výpočte je nutné rozlišovať, či sa jedná o cyklus vybíjania alebo nabíjania batérie resp. standby režim.

Aktuálna hodnota výkonu je menšia ako hodnota rezervovanej kapacity, preto je možné batériu nabíjať vid'. rov 5.2.

$$P < RK \left\{ \begin{array}{l} P_{batt,max}, P_{inv,max} > RK - P \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 + \frac{(RK - P)}{t} \\ \left[ \begin{array}{l} P_{bat,max} > RK - P \\ P_{inv,max} < RK - P \end{array} \right] \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 + \frac{P_{inv}}{t} \\ \left[ \begin{array}{l} P_{bat,max} < RK - P \\ P_{inv,max} > RK - P \end{array} \right] \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 + \frac{P_{bat}}{t} \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Aktuálna hodnota výkonu je väčšia ako hodnota rezervovanej kapacity, preto je možné batériu vybíjať vid'. rov 5.3.

$$P > RK \begin{cases} P_{bat,max}, P_{inv,max} > P - RK \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 - \frac{(P - RK)}{t} \\ \begin{cases} P_{bat,max} > P - RK \\ P_{inv,max} < P - RK \end{cases} \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 - \frac{P_{inv}}{t} \\ \begin{cases} P_{bat,max} < P - RK \\ P_{inv,max} > P - RK \end{cases} \rightarrow E_{bat}^1 = E_{bat}^0 - \frac{P_{bat}}{t} \end{cases} \quad (5.3)$$

V rov 5.2. a rov 5.3. je si nutné uvedomiť, že veličina  $t$  nevyjadruje priamo čas ale interval výpočtu.

#### Výpočet SoC batérie:

SoC batérie je percentuálna hodnota stanovená na základe pomeru aktuálnej hodnoty batérie k celkovej využiteľnej energii batérie.

$$SoC_{\%} = \frac{E_{bat} \cdot 100}{E_{bat,celk}} \quad (5.4)$$

#### Výpočet dodaného/odoberaného výkonu batérie:

Výpočet dodaného/odoberaného výkonu batérie je stanovený na základe energie batérie na začiatku a na konci výpočtovej periódy.

$$P_{bat} = (E_{bat}^1 - E_{bat}^0) \cdot t \quad (5.5)$$

#### Optimalizovaná spotreba objektu:

Optimalizovaná spotreba je súčtom aktuálnej spotreby objektu a dodaného resp. odoberaného výkonu batérie.

$$P_{optimal.} = P + P_{bat} \quad (5.6)$$

V prípade, že maximálny výkon batérie alebo invertora nedosahujú potrebnej hodnoty pre vykrytie výkonovej špičky odberu objektu, nedôjde k úplnej optimalizácii spotreby el. energie a bude prekročená nastavená hodnota RK.

#### Využitá kapacita batérie:

Celková využitá batérie vyjadruje integrálny súčet využitej energie batérie v čase.

$$E_{batt,vyuzita} = \int_1^T \left( \frac{B_{max} \cdot E_{bat,celk}}{100} \right) - E_{bat}(t) dt \quad (5.7)$$

#### Počet plných cyklov:

Počet plných ekvivalentných cyklov je vyjadrený pomerom využitej energie batérie za sledované obdobie k celkovej kapacite batérie.

$$k = \frac{E_{batt,vyuzita}}{E_{bat,celk}} \quad (5.8)$$

Kapacita batérie na konci životnosti projektu :

Pokles kapacity sa stanovuje na základe charakteristiky uvedenej v *kap. 5.1.1.7* pri teplote 20°C a využívaní batérie v rámci 90-10 % SoC.

$$y = -0,0894x^3 + 1,1760x^2 - 6,5346x + 100 \quad (5.9)$$

**Použité veličiny:**

$B_{\max}$	maximálna hodnota SoC batérie (%)
$C_{20}$	c-rate batérie pri 20°C
$E_{\text{bat}}$	energia uložená v batérii (kWh)
$E_{\text{bat,celk}}$	celková využiteľná kapacita batérie (kWh)
$E_{\text{bat}}^1$	energia uložená v batérii na konci výpočtového intervalu (kWh)
$E_{\text{bat}}^0$	energia uložená v batérii na začiatku výpočtového intervalu (kWh)
$E_{\text{bat,využita}}$	celková využitá energia batérie v rámci sledovaného obdobia (kWh)
$k$	počet plných (ekvivalentných) cyklov batérie
$P$	spotreba objektu (kW)
$P_{\text{optimal.}}$	optimalizovaná spotreba objektu po uplatnení peak-shavingu (kW)
$P_{\text{bat}}$	aktuálny odoberaný/dodávaný výkon batérie (kW)
$P_{\text{bat,max}}$	maximálny výkon batérie (kW)
$P_{\text{inv,max}}$	maximálny výkon invertora (kW)
$RK$	nová nastavená rezervovaná kapacita (kW)
$\text{SoC}_{\%}$	výpočet SoC batérie (%)
$t$	výpočtový interval (interval merania)
$T$	celkový počet dát pre výpočet (počet nameraných hodnôt)

**5.1.2.4 Výpočet ekonomiky prevádzky navrhovaného batériového systému**Výpočet penále za prekročenie štvrt' hodinového maxima :

Podľa *kap. 5.1.1.8* je stanovený poplatok (penále/pokuta) za prekročenie zmluvne dohodnutej rezervovanej kapacity ako štvornásobok poplatku za ročnú rezervovanú kapacitu vzťahnutej na každý prekročený kW. Výpočet penále za prekročenie rezervovanej kapacity je určený pre skutočný stav vid'. *rov 5.10.* a taktiež po optimalizácii spotreby objektu vid'. *rov 5.11.*

$$N_{\text{penále,rok}} = \sum_{i=1}^{12} P_{>RK,\max} \cdot \frac{n_{RK-\text{ročná}}}{1000} \cdot 4 \quad (5.10)$$

$$N_{\text{penále,opt,rok}} = \sum_{i=1}^{12} P_{\text{optimal.}>RK,\max} \cdot \frac{n_{RK-\text{ročná}}}{1000} \cdot 4 \quad (5.11)$$



Platba za rezervovanú kapacitu :

Celková ročná platba za rezervovanú kapacitu podľa kap. 5.1.1.8.

$$N_{RK,rok} = \left( RK_{mes.} \cdot \frac{n_{RK-mesačná}}{1000} \cdot 12 \right) + \left( RK_{rok} \cdot \frac{n_{RK-ročná}}{1000} \cdot 12 \right) \quad (5.12)$$

Náklad na straty el. energie :

Náklad na straty el. energie vychádza z energetických strát batériového systému.

$$N_{stráty} = \int_1^T \frac{P_{bat}(t)}{t} \cdot \left( 1 - \left( \frac{\eta_{bat}}{100} \cdot \left( \frac{\eta_{inv}}{100} \right)^2 \right) \right) \cdot n_{el.energie} (dt) \quad (5.13)$$

Úspora z titulu zníženia rezervovanej kapacity objektu:

Znížením rezervovanej kapacity je možné v danom objekte ušetriť značné množstvo nákladov na energie.

$$N_{úspora,PS} = (RK_{stav.,ročn} - RK_{nová,ročná}) \cdot \frac{n_{RK-ročná}}{1000} \cdot 12 \\ + (RK_{stav.,mesačná} - RK_{nová,mesačná}) \cdot \frac{n_{RK-mesačná}}{1000} \cdot 12 \quad (5.14)$$

Cashflow po nasadení batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving :

Cashflow alebo peňažný tok, je možné jednoducho charakterizovať ako príjem alebo výdaj peňažných prostriedkov. Cashflow za určité obdobie (v našom prípade rok) predstavuje rozdiel medzi príjmami a výdajmi peňažných prostriedkov za toto obdobie.

$$CF_{rok} = N_{úspora,PS} + N_{penále,rok} - N_{stráty} - N_{penále,opt,rok} \quad (5.15)$$

Čistá súčasná hodnota :

Čistá súčasná hodnota (NPV z anglického Net Present Value) je finančná veličina vyjadrujúca celkovú súčasnú hodnotu (poníženú o diskont) všetkých peňažných tokov súvisiacich s investičným projektom.

$$NPV = \sum_{i=1}^{T_z} \frac{CF_{rok(i)}}{(1+p)^i} - IN \quad (5.16)$$

Kritérium Interpretácia

NPV  $\geq$  0 Projekt je vhodný na realizáciu

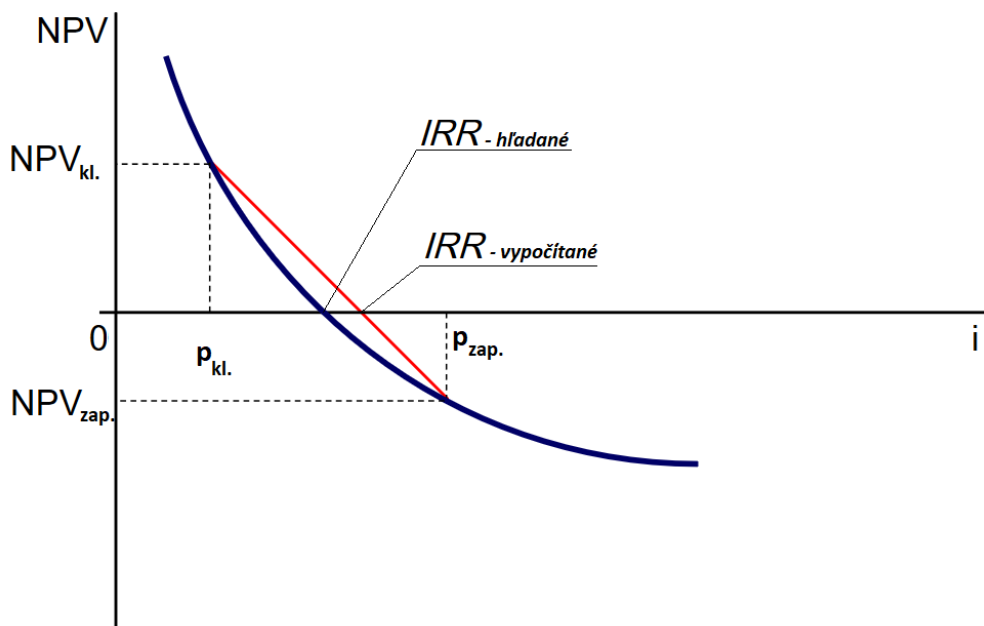
NPV < 0 Projekt nie je vhodný na realizáciu

Vnútorne výnosové percento :

Metóda vnútorného výnosového percenta (IRR z anglického Internal Rate of Return) rovnako rešpektuje časové hľadisko a je ďalšou metódou používanou na zhodnotenie výnosnosti projektu. IRR môže byť definovaná ako diskontná sadzba, pri ktorej sa súčasná hodnota peňažných príjmov z investície rovná kapitálovým výdajom. Je to taká diskontná sadzba, pri ktorej sa čistá súčasná hodnota rovná nule. IRR predstavuje percentuálnu výnosnosť za celé hodnotené obdobie. Za prijateľné investičné projekty sú považované tie, ktoré vyjadrujú vyšší úrok než požadovaná minimálna výnosnosť investície. Pri porovnaní jednotlivých investičných variant medzi sebou bude najvýhodnejšia tá, ktorá bude mať najvyššie IRR.

$$IRR = \sum_{i=1}^{T_z} \frac{CF_{rok(i)}}{(1+p)^i} - IN = 0 \quad (5.17)$$

Pri výpočte vnútorného výnosového percenta bola využitá zjednodušená metóda výpočtu na základe lineárnej interpolácie, tento spôsob bol zvolený z hľadiska zjednodušenia výpočtu IRR tak, aby nemusela byť v rámci výpočtového programu Matlab implementovaná ekonomická nadstavba. Metóda lineárnej interpolácie spočíva v nájdení najvyššej diskontnej sadzby, pri ktorej je NPV ešte kladné a najnižšej diskontnej sadzby, pri ktorej je NPV už záporne.



Obr. 5-8 Znáznornenie výpočtu IRR metódou lineárnej interpolácie – upravené autorom

$$IRR = p_{kl.} + \frac{NPV_{kl.}}{NPV_{kl.} + NPV_{zap.}} \cdot (p_{zap.} - p_{kl.}) \quad (5.18)$$

#### Kritérium Interpretácia

$IRR \geq p$	Projekt je vhodný na realizáciu
$IRR < p$	Projekt nie je vhodný na realizáciu

#### Prostá doba návratnosti:

Prostá doba návratnosti (PayBack method - PB) investičného projektu je tradičné, často používané a jednoduché kritérium vyhodnotenia návratnosti investície. Dobou návratnosti sa rozumie počet období (rokov), za ktoré projekt tvorí kladné peňažné toky (CF) vo výške investovaných nákladov projektu.

Prostá doba návratnosti má inú výpovednú hodnotu ako pravidlo NPV, pretože prisudzuje rovnakú váhu všetkým peňažným tokom pred dátumom návratnosti projektu a nulovú váhu peňažným tokom po tomto dátume, čiže neuvažuje faktor času, peňažné toky vznikajúce po dobe návratnosti projektu a rovnako neuvažuje alternatívne náklady kapitálu.

$$PB = \frac{IN}{CF_{rok}} \quad (5.19)$$

#### Diskontovaná doba návratnosti:

Diskontovaná doba návratnosti (Pay-off method - PO) rešpektuje časovú hodnotu peňazí. Metóda je založená na diskontovanom peňažnom toku a odpovedá na otázku, koľko období (rokov) musí projekt fungovať, aby bol z hľadiska NPV prijateľný. V porovnaní s výsledkom prostej doby návratnosti vychádza u tejto metódy výpočtu k dlhším návratnostiam investičného projektu [41].

$$PO = \frac{IN}{DCF} \quad (5.20)$$

#### **Použité veličiny:**

$CF_{rok}$	Cashflow za obdobie jedného roku (Kč/rok)
$DCF$	Diskontovaný Cashflow (Kč/rok)
$IN$	Počiatočný investičný náklad (Kč)
$IRR$	Vnútorne výnosové percento (%)
$N_{penále,rok}$	Platba za prekročenie rezervovanej kapacity v stávajúcom stave (Kč/rok)
$N_{penále,opt,rok}$	Platba za prekročenie rezervovanej kapacity v optimalizovanom stave (Kč/rok)
$N_{RK,rok}$	Ročná platba za nastavenú rezervovanú kapacitu (Kč/rok)
$N_{stráty}$	Ročná platba za straty energie (Kč/rok)
$n_{RK-ročná}$	Platba za ročnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)
$n_{RK-mesačná}$	Platba za mesačnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)
$n_{el.energie}$	Platba za elektrickú energiu (Kč/MWh)
$RK_{mes.}$	Mesačná rezervovaná kapacita (kW)
$RK_{rok}$	Ročná rezervovaná kapacita (kW)
$RK_{stav.,ročn}$	Ročná rezervovaná kapacita v stávajúcom stave (kW)
$RK_{nová,ročná}$	Ročná rezervovaná kapacita v novom stave (kW)
$RK_{stav.,mesačná}$	Mesačná rezervovaná kapacita v stávajúcom stave (kW)
$RK_{nová,mesačná}$	Mesačná rezervovaná kapacita v novom stave (kW)
$NPV$	Čistá súčasná hodnota (Kč)
$P_{bat}$	Aktuálny odoberaný/dodávaný výkon batérie (kW)
$PB$	Prostá doba návratnosti (rok)
$PO$	Diskontovaná doba návratnosti (rok)
$p$	Diskontná sadzba (diskont)
$T_z$	Doba životnosti projektu (rok)
$\eta_{bat}$	Účinnosť batérie (%)

$\eta_{inv}$ 

Účinnosť invertora (%)

## 5.2 Prípadová štúdia – aplikácia peak-shaving pre reálny objekt

Táto prípadová štúdia sa bude venovať možnosti nasadenia batériovej aplikácie peak-shaving pre konkrétny priemyselný objekt. V rámci spracovanej prípadovej štúdie aplikácie batériového úložiska pre optimalizáciu spotreby objektu budú riešené dva stavy a to :

- Vykrytie výkonových špičiek pri stávajúcej rezervovanej kapacite.
- Zníženie rezervovanej kapacity objektu.

### 5.2.1 Charakteristika objektu a vstupné informácie

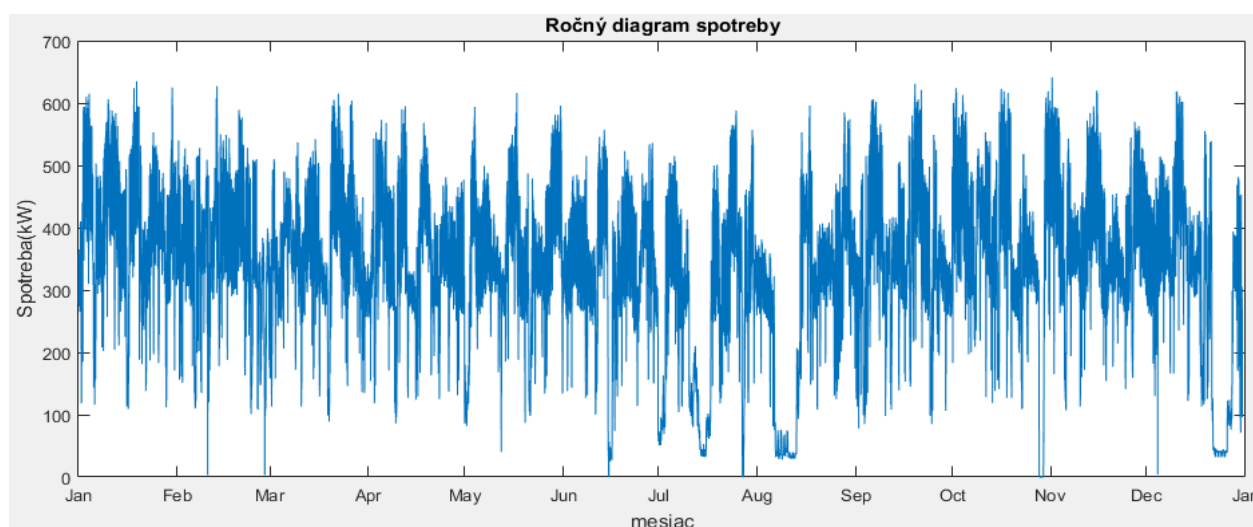
Citlivé informácie o spotrebe objektu a cenách za energie boli poskytnuté na základe dohody s prevádzkovateľom objektu nezverejnenia názvu spoločnosti, ktorá tento objekt vlastní a prevádzkuje.

#### Charakteristika riešeného objektu:

Priemyselný objekt (areál) riešený v rámci prípadovej štúdie batériovej aplikácie peak-shaving disponuje technológiou chemicko-potravinárskou so zameraním na filtráciu alkoholických a nealkoholických nápojov, priemyselných olejov a biopalív, chemických a farmaceutických prípravkov. Ďalšími technologickými procesmi v rámci riešeného priemyselného areálu sú hutníctvo, zlievarenstvo, strojárstvo (výroba kotlov a pecí), výroba izolačných materiálov.

Riešený priemyselný objekt sa nachádza na území distribučnej spoločnosti ČEZ Distribuce a.s., a je pripojený k napäťovej hladine vysokého napätia (VN).

Na Obr. 5-9 je možné pozorovať ročný diagram spotreby objektu, ktorý reprezentuje merané štvrťhodinové maximum spotreby v príslušnom čase a dátume merania od 1.1.2016 do 31.12.2016. Na základe týchto dát je následne mesačne vyhodnocované dodržanie alebo prekročenie zmluvnej hodnoty rezervovanej kapacity objektu. Maximálnou nameranou hodnotou štvrťhodinového maxima riešeného objektu za rok 2016 je 641 kW.



Obr. 5-9 Ročný diagram spotreby riešeného objektu.

#### Obecné vstupné hodnoty výpočtu:

Výpočtový interval (-)

$t = 4;$

Výpočtový interval musí byť nastavený podľa vyhodnocovaných  $\frac{1}{4}$  hodinových dát.

Počiatočná hodnota nabitia (%)

BESS = 90;

Počiatočná hodnota nabitia batériového úložiska v čase spustenia vyhodnotenia navrhovaného riešenia batériovej aplikácie.

Min. hodnota vybitia a max. hodnota nabitia batérie (%)

BESSmin = 10;

BESSmax = 90;

Hodnoty zvolené pre minimálnu a maximálnu hodnotu vybitia/nabitia boli zvolené za predpokladu vychádzajúceho z *kap. 5.1.1.7*.

Optimálny C-rate batérie pri 20°C (-)

Crate = 0.7;

Väčšina výrobcov Li-ion batérií udáva optimálny C-rate z hľadiska životnosti batérie v rozmedzí 0,5-1.

Cena el. energie (Kč/MWh) bez DPH

cena\_silov\_MWh=952;

Cena el. energie objektu je stanovená z vyúčtovaní združených služieb dodávky elektriny stanovená podľa *kap. 5.1.1.9*.

Pomerný investičný náklad invertora (Kč/KW) bez DPH

invest\_kW\_inver = 6000;

Pomerný investičný náklad na batérie (Kč/KWh) bez DPH

invest\_kWh\_batt = 7500;

Merná investícia ostatných nákladov na jednotku kap. batérie (Kč/KWh) bez DPH

invest\_kWh\_bat\_ostatne = 2000;

Stanovenie merných investičných nákladov bolo prevedené na základe jednoduchého prieskumu trhu použitých technológií. Pomerné investičné náklady systému sa môžu líšiť od zvolených výrobcov, typu inštalácie a podobne.

Diskontná sadzba (%)

Diskont = 5;

Diskontná sadzba bola stanovená na hodnotu 5%, ktorá slúži pre overenie funkčnosti vyhotoveného modelu, nakoľko diskont každého podniku je subjektívny, a každý subjekt si diskont vypočítava sám v závislosti na potenciálnych investičných príležitostiach v čase rozhodovania o vhodnosti ich realizácie.

Doba životnosti projektu (rok)

dobazivota = 17;

Doba životnosti projektu bola stanovená na 17 rokov a to vzhľadom na technológiu s najnižšou technickou životnosťou, ktorou býva vo väčšine prípadov invertor, so životnosťou 15-20 rokov.

Účinnosť technológie batérie (%)

ucinnost\_batt = 92;

Účinnosť technológie invertora (%)

ucinnost\_str = 94;

Účinnosti inverterovej a batériovej technológie boli stanovené v medziach udávanými výrobcami týchto technológií.

```
Mesačná cena za ročnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)
RKcenaMW_rok = 171705;
Mesačná cena za mesačnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)
RKcenaMW_mes = 191158;
```

Cena za mesačnú a ročnú rezervovanú kapacitu bola stanovená na základe *Tab. 5-1 Poplatky za rezervovanú kapacitu podľa napäťovej hladiny a distribučnej spoločnosti*, kde boli vybrané príslušné hodnoty pre miesto pripojenia CEŽ Distribuce a.s., a napäťovú hladinu mieste pripojenia VN.

## 5.2.2 Prípadová štúdia – A

### 5.2.2.1 Charakteristika problému

Táto prípadová štúdia sa zaoberá batériovou aplikáciou peak-shaving pre vykrývanie výkonových špičiek objektu pri zachovaní pôvodnej zmluvnej rezervovanej kapacity. V tomto prípade sa rieši prekročenie rezervovanej kapacity počas sledovaného (meraného) obdobia, kedy prevádzkovateľ objektu musí mesačne doplácať penále za toto prekročenie podľa *kap.5.1.1.8*.

Problém prekročenia rezervovanej kapacity nastáva v prípade nesprávneho určenia hodnoty ročnej a mesačnej rezervovanej kapacity voči diagramu spotreby riešeného objektu. Správne nastavenie rezervovanej kapacity objektu je pomerne náročné, pretože v prípade, že táto rezervovaná kapacita bude vysoko predimenzovaná nedôjde k jej využitiu v rámci prevádzky objektu a tým pádom sa jedná o neefektívne vynaložené finančné prostriedky, avšak ak dôjde k prekročeniu zmluvnej rezervovanej kapacity iba v jednom sledovanom štvrt' hodinovom maxime je prevádzkovateľ zákonne nútený uhradiť penále za toto prekročenie bez ohľadu na to, že vo zvyšných meraných štvrt' hodinových maximách bola zmluvná hodnota rezervovanej kapacity dodržaná.

### 5.2.2.2 Vstupné hodnoty výpočtu

Obecné vstupné hodnoty použité pre výpočet sú uvedené v *kap. 5.2.1*. V rámci riešenia je ďalej nutné uviesť konkrétne vstupné hodnoty pre danú prípadovú štúdiu.

#### Konkrétne vstupné hodnoty výpočtu:

```
Automaticky výpočet (1/0)
Automaticky_vypocet = 1;
```

```
Analyzované dáta (1/0)
data_mesiac = 0;
data_rok = 1;
```

```
Výpočtová rezerva veľkosti kapacity batérie (%)
Batt_rezerva = 50;
Výpočtová rezerva veľkosti výkonu invertora (%)
Inv_rezerva = 50;
```

Rezerva kapacity batérie a výkonu invertora je určená s ohľadom na to, že výpočet vychádza zo štvrt' hodinových výkonových maxim, ktoré sú priemernou hodnotou výkonu odoberaného v priebehu meranej štvrt' hodiny, avšak neanalyzuje priebeh spotreby objektu vo vnútri tohto meraného štvrt' hodinového intervalu, ktorý má značný dopad na možnosť pokrytia výkonových špičiek presahujúcich stanovenú rezervovanú kapacitu.

Ďalším dôvodom pre stanovenie vyššie uvedených rezerv výpočtu je ten, že výpočet vychádza z historických dát, avšak v reálnej prevádzke objektu môže dôjsť k prekročeniu analyzovaných dát, čo by viedlo k neschopnosti navrhovaného systému pokryť vyskytnuté výkonové špičky odberu.

```

Stávajúca ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)
RK_skut_rok = 610;
Stávajúca mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)
RK_skut_mes = 0;

Novo nastavená ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)
RK_rok = 610;
Novo nastavená mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)
RK_mes = 0;

```

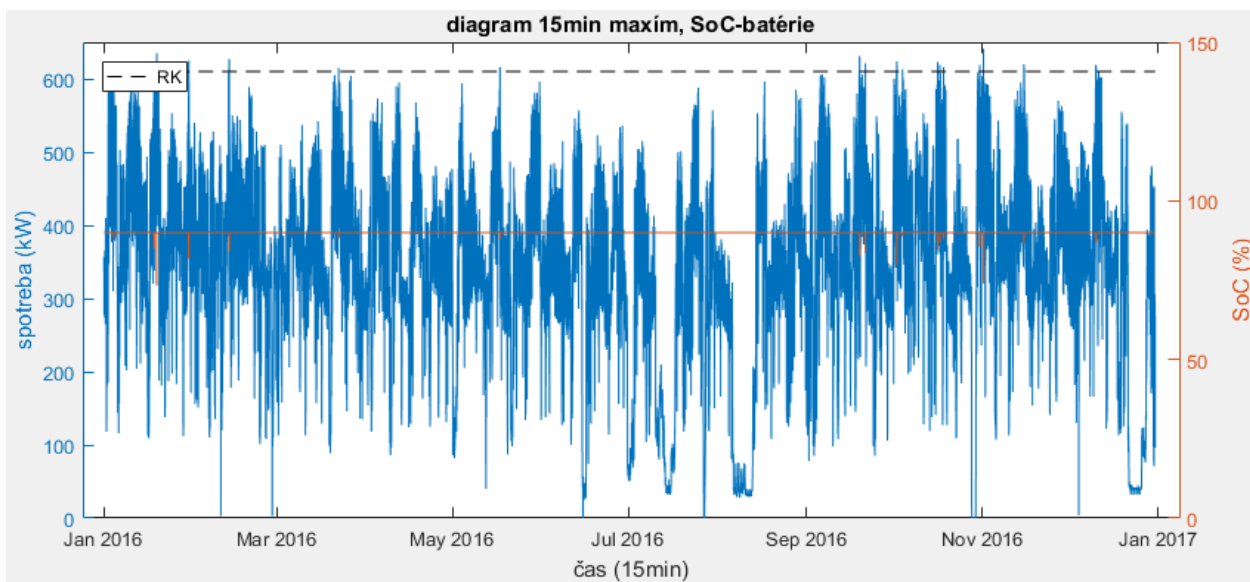
Stávajúca rezervovaná kapacita objektu ostane nezmenená.

### 5.2.2.3 Výsledok technicko-ekonomického návrhu batériového systému

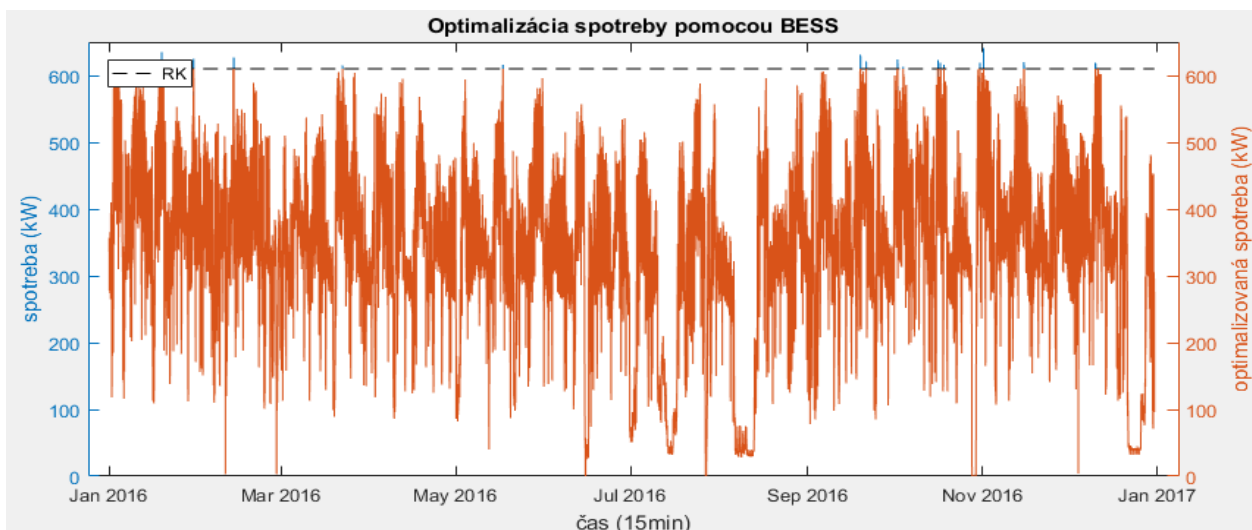
V rámci výpočtu návrhu batériového systému došlo k spracovaniu jednotlivých vstupných parametrov na základe predošlých kapitol. Hlavnými výstupmi vytvoreného programu sú grafické zobrazenia vypočítaných hodnôt.

#### Batériový systém :

Kapacita batériového systému bola automatickým výpočtom stanovená na 65 kWh a maximálny výkon invertora potrebný na pokrytie výkonových špičiek bol automatickým výpočtom stanovený na 45 kW. V rámci vypočítaných hodnôt batérie a invertora sú zahrnuté taktiež zvolené rezervy výpočtu.

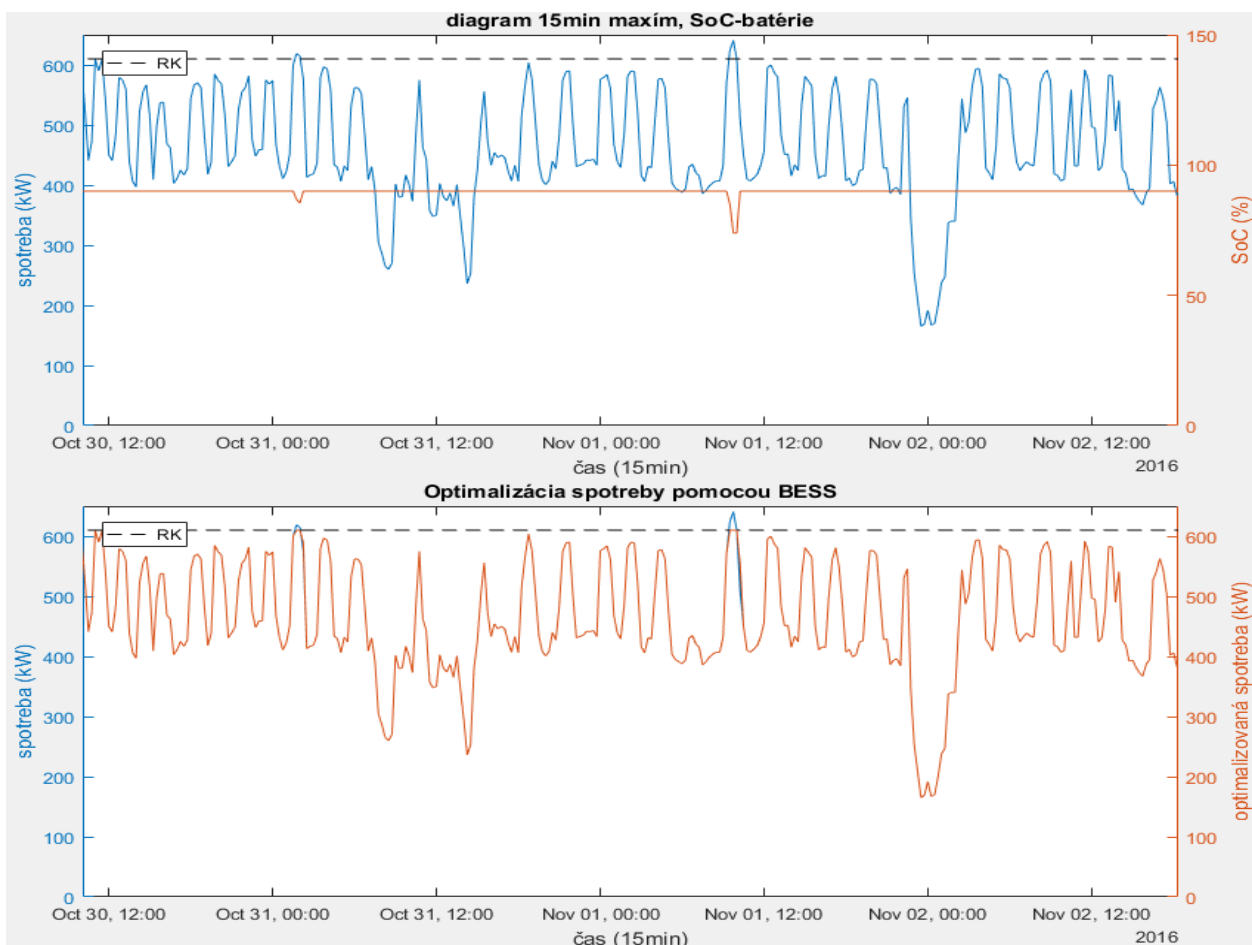


Obr. 5-10 A - Ročný diagram spotreby riešeného objektu a SoC batérie.



Obr. 5-11 A - Ročný diagram optimalizovanej spotreby riešeného objektu.

Na Obr. 5-10 je možné pozorovať, že v rámci analyzovaných dát jedného roka došlo k viacnásobnému prekročeniu zmluvnej rezervovanej kapacity, tento diagram taktiež znázorňuje SoC batérie, ktorý hovorí o tom koľko energie je potrebné na danú odberovú špičku dodať tak, aby došlo k jej pokrytiu, a taktiež koľko energie sa v batérii v danom čase nachádza pre možnosť jej ďalšieho využitia. Diagram Obr. 5-11 zobrazuje ročnú optimalizovanú spotrebu objektu tak, aby nedošlo k prekročeniu zmluvnej hodnoty rezervovanej kapacity.

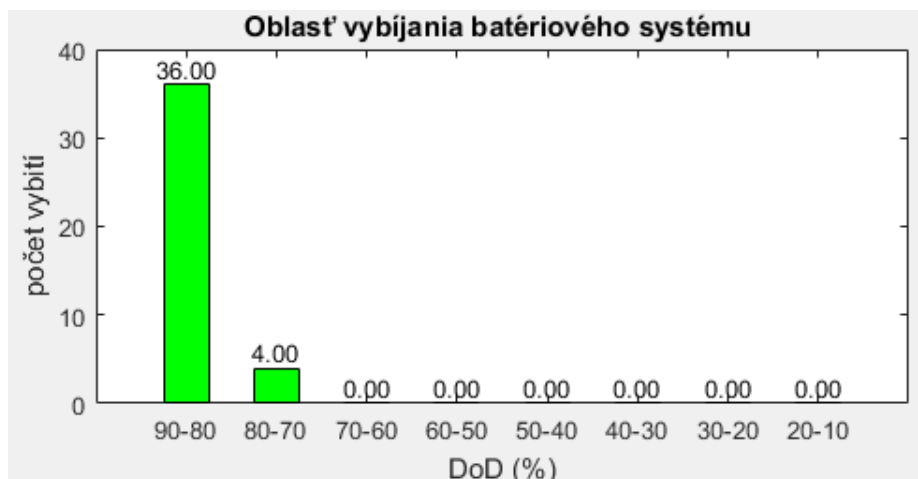


Obr. 5-12 A - Približená časová os x diagramu spotreby na čas najvyššej výkonovej špičky.

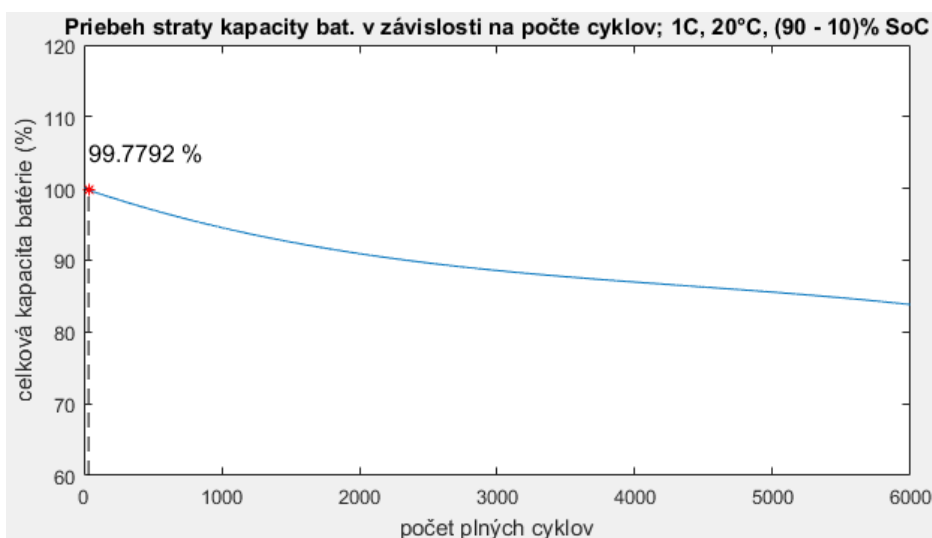


Vyobrazenia *Obr. 5-10* a *Obr. 5-11* sú previazané spoločnou osou x (časom), preto je s nimi možné manipulovať a zobraziť požadovaný časový úsek pre detailnejšiu analýzu fungovania batériového systému v aplikácii peak-shaving vid'. *Obr. 5-12*. Na tomto diagrame je zobrazený čas a dátum štvrt' hodinových maxim, kedy došlo k najväčším prekročeniam zmluvnej rezervovanej kapacity s nameranými štvrt' hodinovými maximami 624 kW a 641 kW, čiže rezervovaná kapacita bola v prvej štvrt' hodine prekročená o 14 kW a následne v ďalšej štvrt' hodine o 31 kW nad nastavenú rezervovanú kapacitu 610 kW. Ďalej môžeme sledovať na zobrazení výraznejší pokles SoC batérie približne o 19 %, čo odpovedá energií 12,5 kWh, potrebnej k injektácii na pokrytie uvedených odberových špičiek.

Na *Obr. 5-13* je zobrazený graf počtu vybití batériového systému pre danú oblasť vybitia batérie DoD (Depth of Discharge) rozdelenej po 10 % pre oblasť. Z tohto grafu je pozorovateľné, že batériové úložisko pracuje v oblasti od 90 do 70 % DoD. Toto nízke využitie kapacity batériového úložiska je zapríčinené hlavne málo častým výskytom výkonových špičiek a taktiež pomerne nízkym prúdovým pomerom (C-rate) tak, aby bolo dodržané optimálne prevádzkovanie batérie stanovené výrobcom batérii. Ďalším dôvodom nízkeho využitia kapacity batérie je pomerne vysoko zvolená rezerva kapacity batérii na začiatku výpočtu.



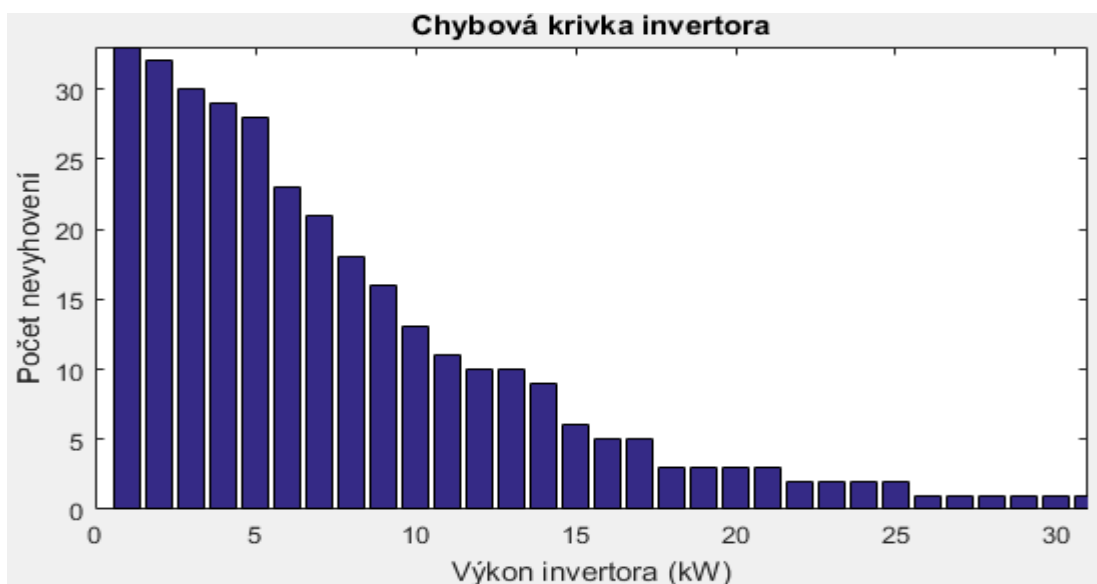
*Obr. 5-13 A - Graf oblasti vybijania batérie.*



*Obr. 5-14 A - Pribeh poklesu kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov.*

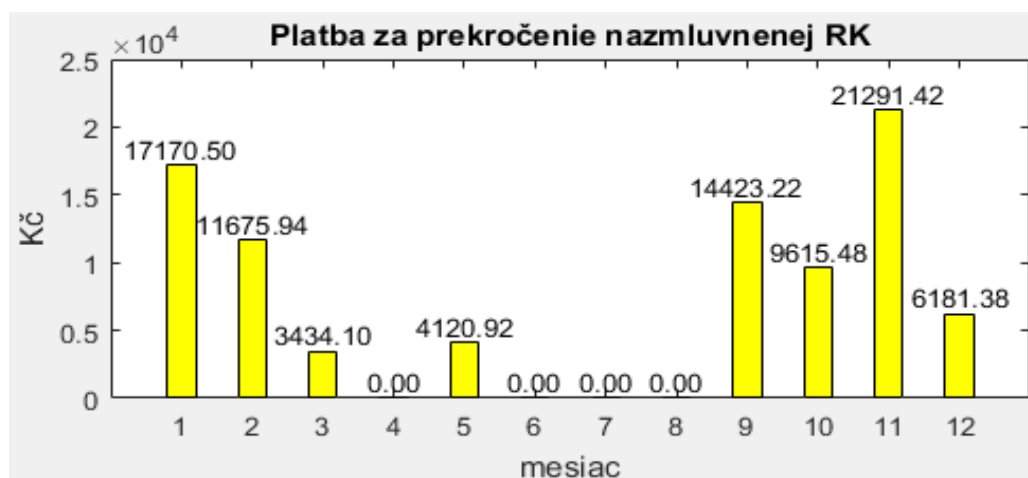
Pokles kapacity batérie v priebehu životnosti projektu je vyobrazený na *Obr. 5-14*, kde môžeme pozorovať iba minimálnu stratu kapacity batérie stanovenú na základe *kap. 5.1.1.7*. Táto nízka strata pôvodnej kapacity batérie je zapríčinená nízkym využitím batérie vid'. *Obr. 5-13*, a taktiež tým, že batéria je využívaná iba v optimálnej prevádzkovej oblasti, kedy nedochádza k jej nadmernej degradácii.

V rámci návrhu batériového systému je taktiež navrhovaný optimálny výkon invertora, avšak výpočtový algoritmus operuje s maximálnym trvalým prevádzkovým výkonom invertora a nezohľadňuje jeho špičkový výkon (preťaženie), s ktorým je možné prevádzkovať inverter obmedzenú dobu. Z tohto dôvodu je v rámci návrhu batériového systému vytvorená chybová krivka invertora vid'. *Obr. 5-15*, podľa ktorej je možné vypočítaný výkon invertora upraviť tak, aby rešpektoval jeho krátkodobý špičkový výkon. Chybová krivka invertora hovorí o počte nevyhovení (koľko krát nedôjde k požadovanej optimalizácii spotreby počas sledovaného obdobia) na príslušnom výkone invertora. V tomto prípade nedochádza k úprave výkonu invertora.



*Obr. 5-15 A - Chybová krivka invertora.*

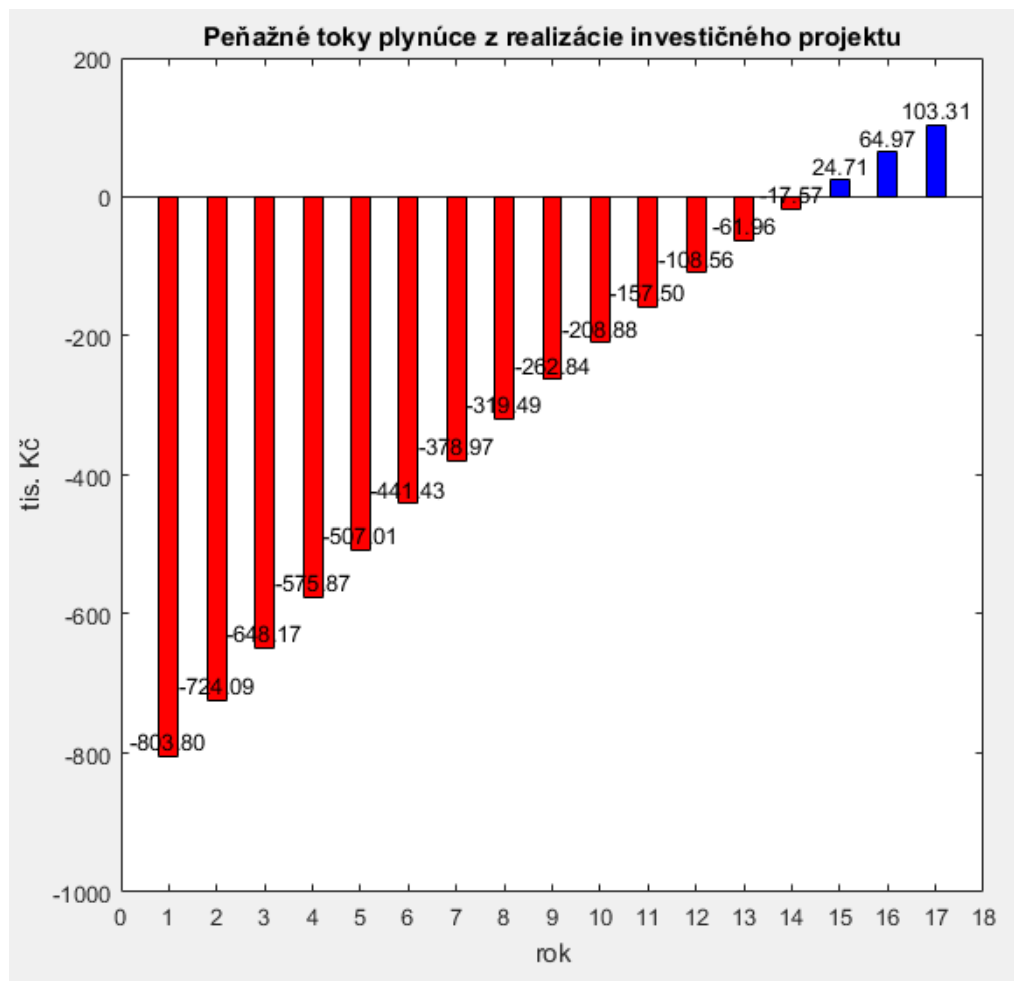
Ekonomika prevádzky navrhovaného riešenia:



*Obr. 5-16 A - Prehľad mesačných platieb za prekročenie RK v stávajúcom stave.*

Na Obr. 5-16 sú zobrazené mesačné platby za prekročenie zmluvnej rezervovanej kapacity v stávajúcom stave bez využitia batériového systému, pričom najvyššie prekročenie je vykázané za november 2016, kedy došlo k prekročeniu rezervovanej kapacity o 31 kW, čo znamená finančnú penalizáciu pre prevádzkovateľa objektu vo výške približne 21 tis. Kč. Vo výsledku musel prevádzkovateľ objektu za rok 2016 zaplatiť na penalizáciách za prekročenie zmluvnej rezervovanej kapacity približne 88 tis. Kč.

V tomto prípade využitia aplikácie peak-shaving, kedy nedochádza k úprave rezervovanej kapacity objektu (areálu) bude finančnú úsporu predstavovať práve poníženie nákladov vynaložených ročne na penalizácie za prekročenie zmluvnej rezervovanej kapacity.



Obr. 5-17 A - Peňažné toky plynúce z realizácie investičného projektu v jednotlivých rokoch.

Ako jeden z ďalších výstupov, vytvorený program poskytuje grafické zobrazenie peňažných tokov ponížených o diskontovanú mieru plynúcich z realizačného projektu počas jeho doby životnosti vid'. Obr. 5-17. Z tohto grafického znázornenia je možné pozorovať, že do 14. roku životnosti projektu, peňažné toky plynúce z tohto projektu vykazujú záporné hodnoty, tzn. projekt za toto obdobie nie je rentabilný. Zmena nastáva v 15. roku životnosti projektu, kedy peňažné toky nadobúdajú kladných hodnôt, tým pádom môžeme povedať, že k splateniu počiatočnej investície dôjde v tomto roku. V 17. roku životnosti projektu kumulovaná hodnota peňažných tokov plynúcich z realizácie nadobúda hodnotu 103,3 tis. Kč, čo znamená, že daný projekt disponuje kladnou hodnotou NPV a tým pádom môžeme usúdiť, že sa jedná o projekt vhodný k realizácii. Počiatočný investičný náklad projektu predstavuje 887,5 tis. Kč.

Tab. 5-2 Sumarizácia prípadovej štúdie A

**VSTUPNÉ HODNOTY****Riešený objekt**

Stávajúca ročná rezerovaná kapacita	610 kW
Stávajúca mesačná rezerovaná kapacita	0 kW
Nastvená ročná rezerovaná kapacita	610 kW
Nastavená mesačná rezerovaná kapacita	0 kW
Mesačná cena za ročnú rezerovanú kapacitu	171,705 Kč/kW a mesiac
Mesačná cena za mesačnú rezerovanú kapacitu	191,158 Kč/kW a mesiac
Cena elektrickej energie	952 Kč/MWh

**Batériový systém**

Počiatočná hodnota nabitia	90 %
Maximálna hodnota nabitia	90 %
Minimálna hodnota vybitia	10 %
C-rate, pri 20 °C	0.7 C
Účinnosť batérie	92 %
Účinnosť invertora	94 %
Maximálny počet plných ekvivalentných cyklov batérie	6000
Rezerva výpočtu batérie	50 %
Rezerva výpočtu invertora	50 %
Doba životnosti projektu	17 rokov
Diskontná sadzba	5 %
Pomerný investičný náklad invertora	6,000 Kč/kW
Pomerný investičný náklad na batérie	7,500 Kč/kWh
Merná investícia ostatných nákladov	2,000 Kč/kWh

**VÝSTUPNÉ HODNOTY****Technický návrh na základe vstupných hodnôt**

Kapacita batériového úložiska	65 kWh
Maximálny výkon batériového úložiska	45.5 kW
Využitá kapacita batérie za sledované obdobie	134.5 kWh
Počet plných ekvivalentných cyklov batérie za sledované obdobie	2
Pokles kapacity batérie v priebehu životnosti projektu	0.22 %
Maximálny výkon invertora	45 kW

**Ekonomické vyhodnotenie vhodnosti realizácie projektu**

Počiatočný investičný náklad	887.5 tis. Kč
Ročná úspora zmenou ročnej rezervovanej kapacity	0 Kč/rok
Ročná úspora zmenou mesačnej rezervovanej kapacity	0 Kč/rok
Ročná úspora na platbách za penalizácie využitím aplikácie peak-shaving	87,913 Kč/rok
Ročná platba za straty energie	29 Kč/rok
Ročný peňažný tok	87,884 Kč/rok
Čistá súčasná hodnota (NPV)	103.3 tis. Kč
Vnútorne výnosové percento	6.53 %
Prostá doba návratnosti investičného projektu	10 rokov
Diskontovaná doba návratnosti investičného projektu	15 rok

#### 5.2.2.4 Výsledné zhodnotenie prípadovej štúdie A

V tejto prípadovej štúdií bolo batériové úložisko v aplikácii peak-shaving využité na vykrývanie výkonových špičiek bez toho aby došlo k zmene zmluvnej rezervovanej kapacity objektu. V rámci stávajúceho stavu objektu došlo počas sledovaného obdobia k viacerým menším prekročeniam rezervovanej kapacity, za tieto prekročenia boli prevádzkovateľovi objektu vyúčtované v rámci sledovaného obdobia penále vo výške 88 tis. Kč.

Vo vytvorenom programe bolo navrhnuté batériové úložisko s kapacitou 65 kWh a výkonom invertora 45 kW tak, aby došlo k pokrytiu výkonových špičiek odberu, ku ktorým môže dochádzať pri nesprávne určenej hladiny rezervovanej kapacity, neplánovanom navýšení odberu, nedodržaní plánovanej prevádzky objektu. Ďalším obdobným využitím batériového úložiska by mohol byť prípad plánovaného navýšenia odberu objektu, kedy by však nebolo možné zvýšiť rezervovanú kapacitu objektu z titulu obmedzenia rezervovaným príkonom objektu.

Na základe čistej súčasnej hodnoty je projekt vhodný pre realizáciu, avšak diskontovaná návratnosť tohto riešenia sa pohybuje v 15. roku životnosti projektu, čo nemusí pre investora predstavovať vhodnú investičnú príležitosť. Pomerne dlhá doba návratnosti tohto riešenia je zapríčinená veľkou kapacitou batériového úložiska, ktorá je nevyužitá, avšak potrebná, aby bolo batériové úložisko schopné dodať potrebný výkon. K zlepšeniu návratnosti batériového úložiska by došlo v prípade, že by batéria pracovala s vyšším než výrobcami udávaným, optimálnym C-rate. Zvýšený C-rate má za dôsledok značné zníženie kapacity a cyklov života batérie, avšak pri takto nízkom využití batériového systému a vhodne zvolenom C-rate by nemuseli byť spomenuté negatívne dopady významné. Ďalšia možnosť ako dosiahnuť lepšiu návratnosť batériového systému pre aplikáciu peak-shaving je využitie batériového úložiska pre viaceré batériové aplikácie (UPS, peak-shifting, ...) s tým, že kapacita batérie bude prerozdelená medzi jednotlivé aplikácie, čím by bolo možné dosiahnuť potrebný výkon pri optimálnom C-rate a došlo by k zlepšeniu ekonomiky prevádzky batériového úložiska.

### 5.2.3 Prípadová štúdia – B

#### 5.2.3.1 Charakteristika problému

Táto prípadová štúdia sa zaoberá batériovou aplikáciou peak-shaving pre zníženie rezervovanej kapacity objektu. Novo zvolená rezervovaná kapacita bude nižšia ako v stávajúcom stave a batériové úložisko bude slúžiť k vykrytiu odberových špičiek, ktoré vzniknú jej znížením.

#### 5.2.3.2 Vstupné hodnoty výpočtu

Obecné vstupné hodnoty použité pre výpočet sú uvedené v *kap. 5.2.1*. V rámci riešenia je ďalej nutné uviesť konkrétne vstupné hodnoty pre danú prípadovú štúdiu.

Konkrétne vstupné hodnoty výpočtu:

Automaticky výpočet (1/0)  
Automaticky\_vypocet = 1;

Analyzované dáta (1/0)  
data\_mesiac = 0;  
data\_rok = 1;

Výpočtová rezerva veľkosti kapacity batérie (%)  
Batt\_rezerva = 50;  
Výpočtová rezerva veľkosti výkonu invertora (%)

```
Inv_rezerva = 30;
```

```
Stávajúca ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)
```

```
RK_skut_rok = 610;
```

```
Stávajúca mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)
```

```
RK_skut_mes = 0;
```

```
Novo nastavená ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)
```

```
RK_rok = 550;
```

```
Novo nastavená mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)
```

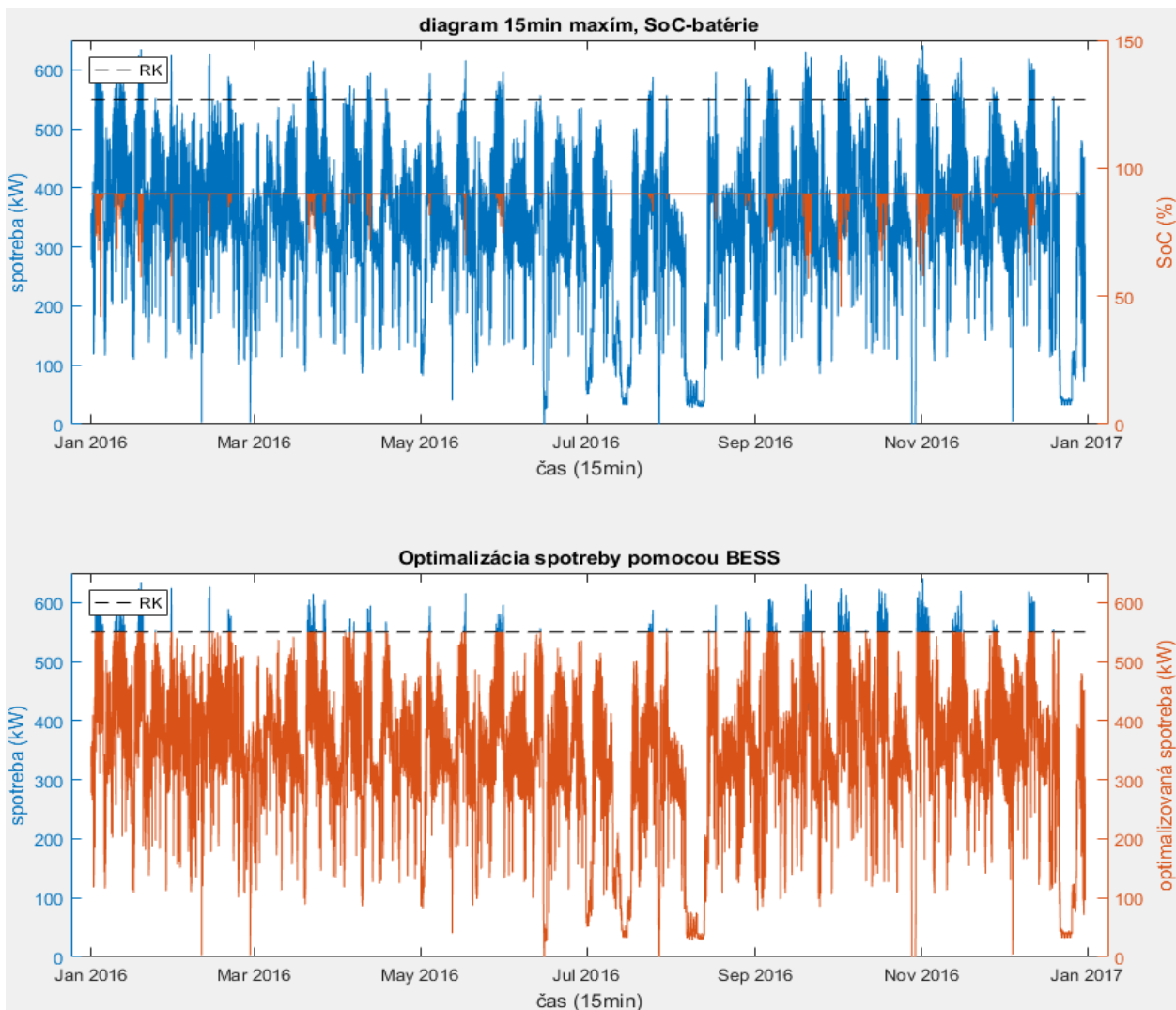
```
RK_mes = 0;
```

Pre overenie funkčnosti modelu bola zvolená nová hodnota rezervovanej kapacity 550 kW.

### 5.2.3.3 Výsledok technicko-ekonomického návrhu batériového systému

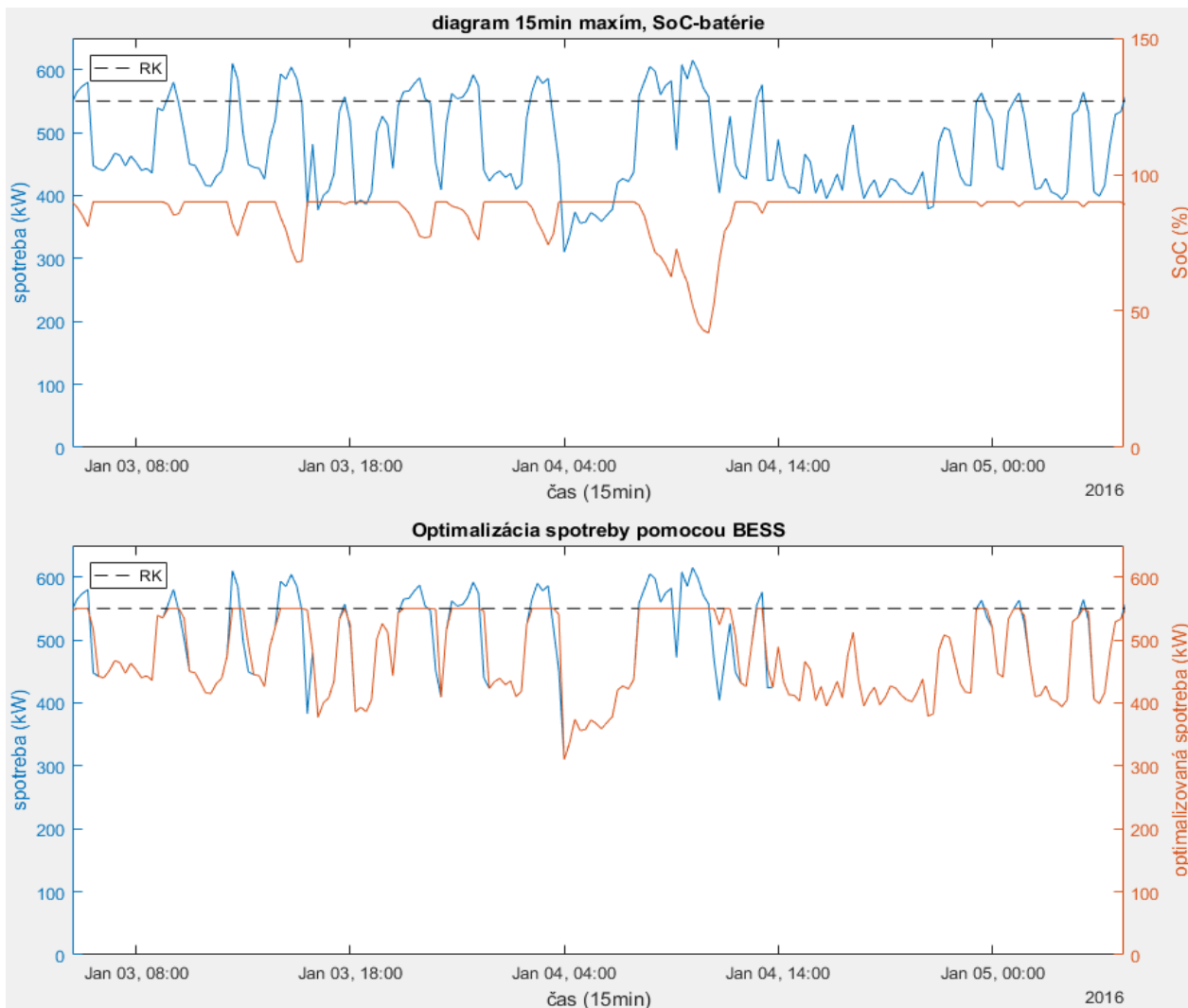
#### Batériový systém :

Kapacita batériového systému bola automatickým výpočtom stanovená na 190 kWh a maximálny výkon invertora potrebný na pokrytie výkonových špičiek bol automatickým výpočtom stanovený na 130 kW. V rámci vypočítaných hodnôt batérie a invertora sú zahrnuté taktiež zvolené rezervy výpočtu.

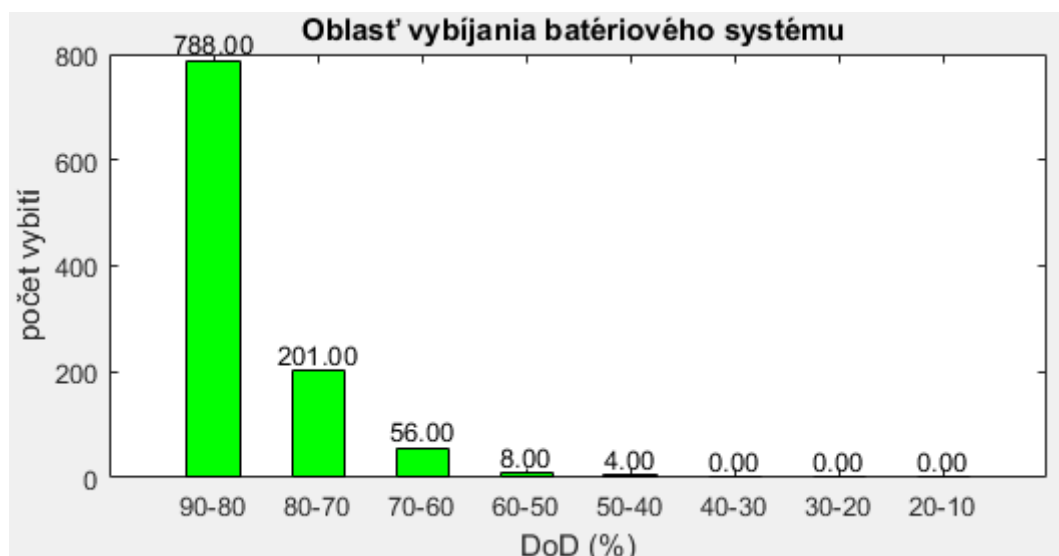


Obr. 5-18 B - Ročný diagram skutočnej, optimalizovanej spotreby objektu a SoC batérie.

K najväčšiemu poklesu SoC batérie pod úroveň 60 % došlo 4. januára, kedy tento pokles spôsobilo viacero po sebe nasledujúcich špičkových odberov nad úroveň rezervovanej kapacity objektu vid'. Obr. 5-19.

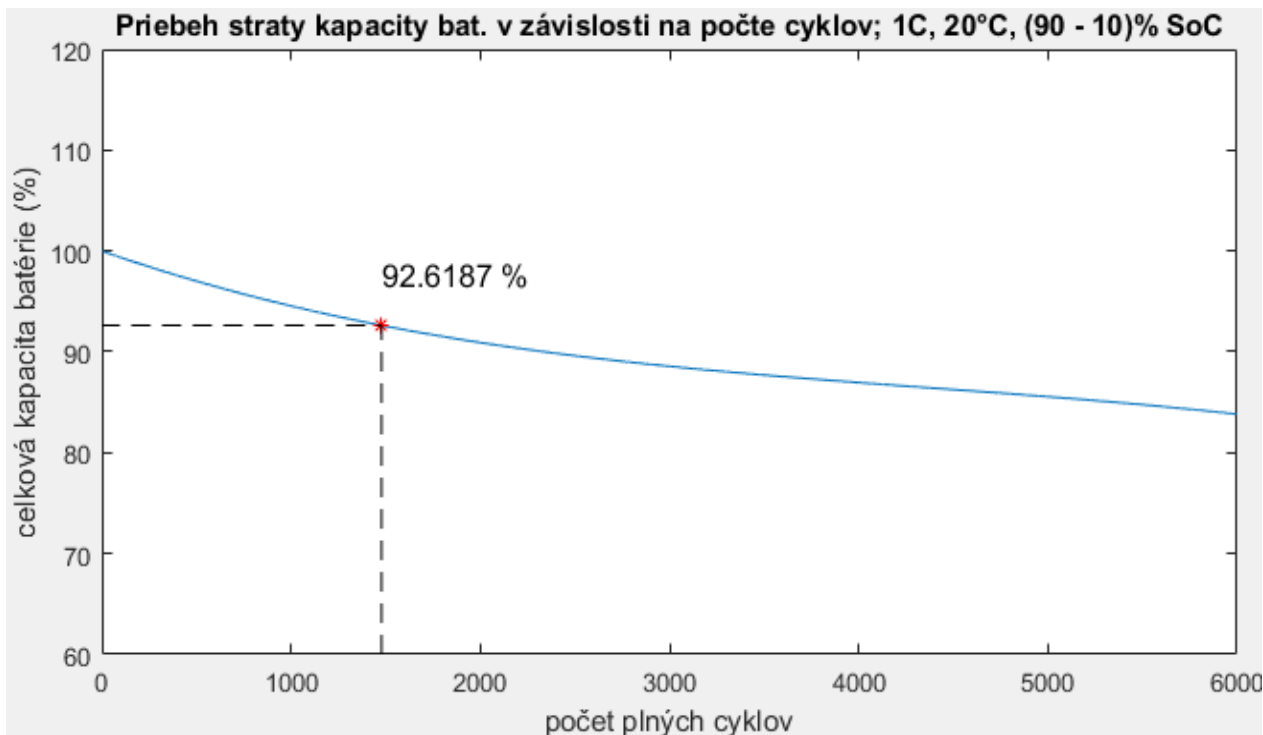


Obr. 5-19 B - Približná časová os x diagramu spotreby na čas najväčšieho poklesu SoC batérie.



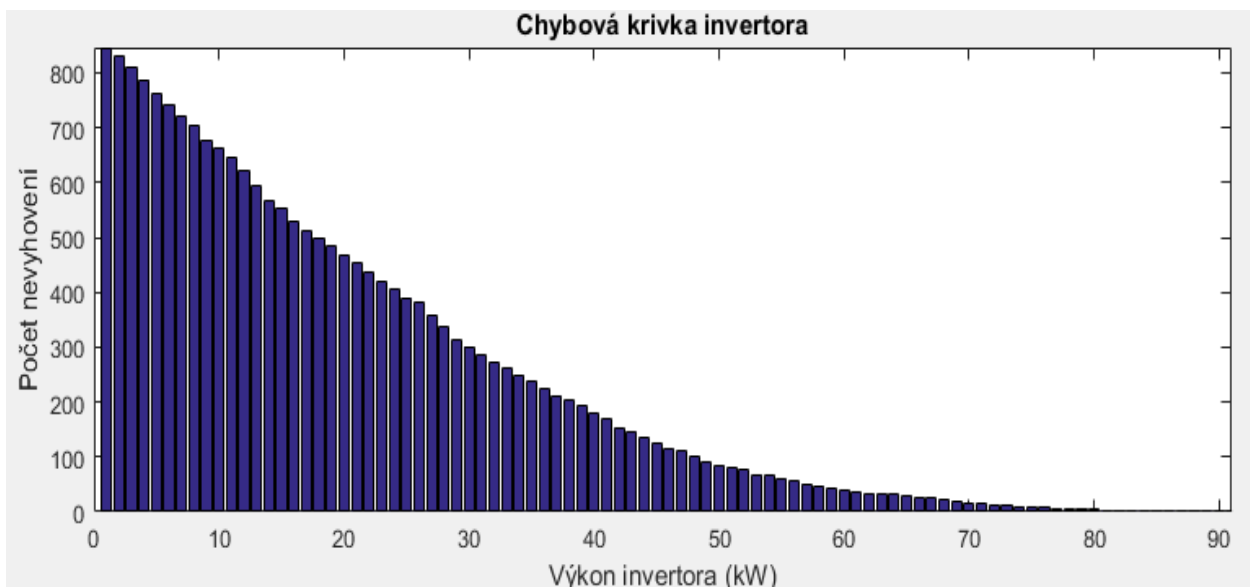
Obr. 5-20 B - Graf oblasti vybíjania batérie

Na Obr. 5-20 môžeme vidieť, že batériové úložisko pracuje v oblasti od 90 do 40 % DoD. Toto využitie kapacity batériového úložiska je zapríčinené hlavne pomerne nízkym prúdovým pomerom (C-rate) tak, aby bolo dodržané optimálne prevádzkovanie batérie stanovené výrobcom batérii, čo má vplyv na veľkosť kapacity batérie. Ďalším dôvodom nízkeho využitia kapacity batérie je pomerne vysoko zvolená rezerva kapacity batérii na začiatku výpočtu.



Obr. 5-21 B - Priebeh poklesu kapacity batérie v závislosti na počte plných cyklov.

Podľa Obr. 5-21 môžeme pozorovať, že priebehu životnosti projektu došlo vplyvom degradácie k poklesu nominálnej kapacity batérie približne o 7,4 %.



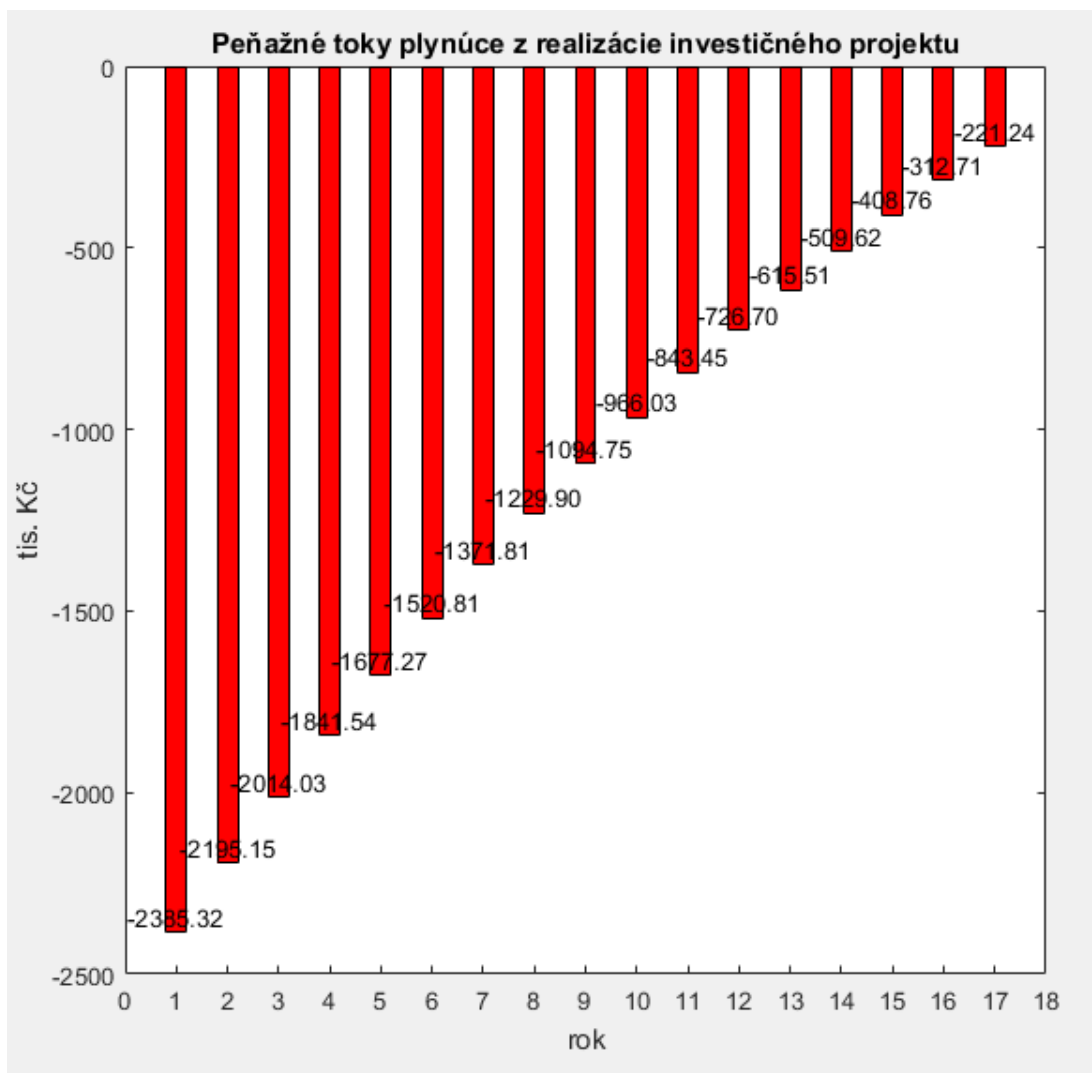
Obr. 5-22 B - Chybová krivka invertora.



V prípade štúdie B nedošlo k úprave maximálneho výkonu inventora na základe chybovej krivky vid'. Obr. 5-22 a to z dôvodu ponechania väčšej výkonovej rezervy, ktorá je v prípade takto využitej aplikácie peak-shaving potrebná.

#### Ekonomika prevádzky navrhovaného riešenia:

Na Obr. 5-16 sú zobrazené mesačné platby za prekročenie zmluvnej rezervovanej kapacity v stávajúcom stave bez využitia batériového systému. V rámci návrhu batériového systému sa počíta s pokrytím týchto výkonových špičiek a tým pádom aj s úsporou nákladov na platbách za penalizácie plynúce z prekročenia rezervovanej kapacity.



Obr. 5-23 B - Peňažné toky plynúce z realizácie investičného projektu v jednotlivých rokoch.

V tomto prípade môžeme sledovať, že počas doby životnosti projektu kumulatívne vyjadrené peňažné toky plynúce z investície nepresiahli hodnotu kedy je  $NPV \geq 0$ , a preto je možné konštatovať, že tento návrh nie je vhodný pre realizáciu.

Tab. 5-3 Sumarizácia prípadovej štúdie B

**VSTUPNÉ HODNOTY****Riešený objekt**

Stávajúca ročná rezerovaná kapacita	610	kW
Stávajúca mesačná rezerovaná kapacita	0	kW
Nastvená ročná rezerovaná kapacita	550	kW
Nastavená mesačná rezerovaná kapacita	0	kW
Mesačná cena za ročnú rezerovanú kapacitu	171 705	Kč/kW a mesiac
Mesačná cena za mesačnú rezerovanú kapacitu	191 158	Kč/kW a mesiac
Cena elektrickej energie	952	Kč/MWh

**Batériový systém**

Počiatočná hodnota nabitia	90	%
Maximálna hodnota nabitia	90	%
Minimálna hodnota vybitia	10	%
C-rate, pri 20 °C	0,7	C
Účinnosť batérie	92	%
Účinnosť invertora	94	%
Maximálny počet plných ekvivalentných cyklov batérie	6000	
Rezerva výpočtu batérie	50	%
Rezerva výpočtu invertora	30	%
Doba životnosti projektu	17	rokov
Diskontná sadzba	5	%
Pomerný investičný náklad invertora	6 000	Kč/kW
Pomerný investičný náklad na batérie	7 500	Kč/kWh
Merná investícia ostatných nákladov	2 000	Kč/kWh

**VÝSTUPNÉ HODNOTY****Technický návrh na základe vstupných hodnôt**

Kapacita batériového úložiska	190	kWh
Maximálny výkon batériového úložiska	133	kW
Využitá kapacita batérie za sledované obdobie	14 974	kWh
Počet plných ekvivalentných cyklov batérie za sledované obdobie	87	
Pokles kapacity batérie v priebehu životnosti projektu	7,39	%
Maximálny výkon invertora	130	kW

**Ekonomické vyhodnotenie vhodnosti realizácie projektu**

Počiatočný investičný náklad	2 585	tis. Kč
Ročná úspora zmenou ročnej rezervovanej kapacity	123 627,60	Kč/rok
Ročná úspora zmenou mesačnej rezervovanej kapacity	0	Kč/rok
Ročná úspora na platbách za penalizácie využitím aplikácie peak-shaving	87 913	Kč/rok
Ročná platba za straty energie	1 877	Kč/rok
Ročný peňažný tok	209 664	Kč/rok
Čistá súčasná hodnota (NPV)	-221,24	tis. Kč
Vnútorne výnosové percento	3,84	%
Prostá doba návratnosti investičného projektu	12,4	rokov
Diskontovaná doba návratnosti investičného projektu	-	rok

#### 5.2.3.4 Výsledné zhodnotenie prípadovej štúdie B

Prípadová štúdia B má slúžiť ako demonštrácia možného zníženia rezervovanej kapacity objektu o 60 kW. V rámci tejto štúdie došlo k návrhu batériového systému s kapacitou 190 kWh a výkonom invertorov 130 kW. Z ekonomického hľadiska sa však zobrazené využitie batériového systému pre zníženie rezervovanej kapacity nejaví ako rentabilná investícia. Pod nevhodnosť projektu po ekonomickej stránke sa vo veľkej miere podpisuje veľkosť potrebnej výpočtovej rezervy v rámci tohto riešenia a nízky C-rate batérie. Avšak najväčším problémom aplikácie tohto riešenia je súčasná cena technológie batériového systému na trhu, ktorej pomerné náklady na zníženú kW rezervovanej kapacity sú približne 43 tis. Kč, pričom platba za kW rezervovanej kapacity za dobu životnosti projektu činí približne 35 tis. Kč. K zlepšeniu rentability projektu by mohlo dôjsť podobne ako v prípadovej štúdií A *kap. 5.2.2.4*, kedy by pre batériovú aplikáciu peak-shaving bola vyčlenená potrebná kapacita batérie a v rámci zvyšnej kapacity by operovali iné batériové aplikácie.

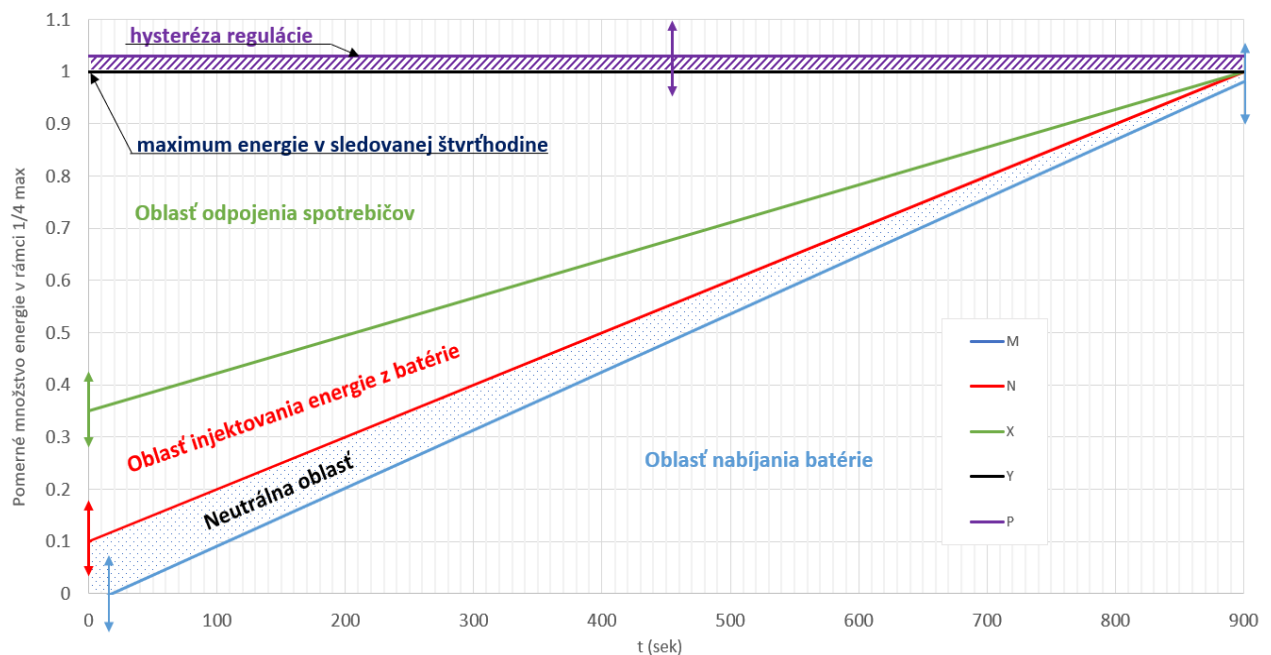
## 6 VALIDÁCIA SIMULAČNÉHO MODELU S NÁVRHOM RIADIACEJ LOGIKY

Táto kapitola práce sa venuje návrhu riadiacej logiky batériovej aplikácie peak-shaving. Ďalej sa táto časť práce bude venovať verifikácii navrhnutého simulačného modelu (programu) s využitím navrhutej riadiacej logiky batériovej aplikácie na základe meraných dát so sekundovým intervalom objektu, ktorý bol predmetom návrhu batériového úložiska v aplikácii peak-shaving v predošlej kapitole.

### 6.1 Návrh riadiacej logiky pre batériovú aplikáciu peak-shaving

#### 6.1.1 Regulačné charakteristiky

Návrh riadiacej logiky batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving vychádza zo znalosti maximálneho množstva el. energie, ktoré je možné odobrať z distribučnej siete tak, aby nedošlo k prekročeniu zmluvnej rezervovanej kapacity. Tento princíp je podobný ako ten s ktorým pracujú súčasné regulačné systémy štvrťhodinových maxím využívajúce odopínanie záťaže tak, aby nedošlo k prekročeniu stanovených medzí (charakteristík). Navrhovaná riadiaca logika funguje na základe nastaviteľných charakteristík vid'. Obr. 6-1, pomocou ktorých je možné prispôsobiť aplikáciu peak-shaving tak, aby rešpektovala diagram spotreby objektu alebo konkrétny návrh napr. aby nedochádzalo k bezdôvodnému vybíjaniu resp. nabíjaniu batérie, čím by dochádzalo k zníženiu jej životnosti a dodatočným stratám systému.



Obr. 6-1 Obecná riadiaca logika batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving.

Z Obr. 6-1 je vidieť, že sledovaná oblasť kumulatívneho vyjadrenia energie vo štvrťhodinovom intervale (900 sekúnd) je rozdelená štyrmi charakteristikami na oblasti pôsobenia batériového úložiska:

Neutrálna oblasť charakteristiky:

V prípade, že sa odberu el. energie nachádza v tejto oblasti batéria je v standby režime a nedochádza k jej vybíjaniu ani nabíjaniu. Neutrálna oblasť je ohraničená regulačnými charakteristikami z hora N (červená) a zdola M (modrá).

Správnym nastavením týchto charakteristík je možné nastaviť určitý stupeň oneskorenia spotreby, kedy sa počíta s tým, že veľký odber el. energie spočiatku sledovanej štvrt'hodiny môže byť vyregulovaný následným poklesom spotreby a tým pádom nebude nutné využiť batériový systém na vykrytie výkonových špičiek. Opačný princíp platí pre nabíjanie batérie, kedy je oddialený proces nabíjania, aby sa zamedzilo okamžitému nabíjaniu batérie ak má vývoj odberu el. energie trend smerujúci nad charakteristiku N. Neutrálna oblasť ďalej bráni okamžitému prechodu zo stavu nabíjania batérie do stavu vybíjania alebo opačne.

Oblasť nabíjania batérie:

V prípade, že sa odber el. energie nachádza v tejto oblasti dochádza k nabíjaniu batérie maximálnym výkonom, ktorý neprekročí charakteristiku M. V prípade, že je batéria nabitá na maximálne stanovené SoC, nedochádza k žiadnej akcii. Charakteristika M v tomto prípade slúži ako nastavenie maximálnej hranice, pokiaľ bude batéria nabíjať tak, aby nedošlo k veľkému navýšeniu odberu objektu vplyvom práve tohto nabíjania batérie.

Oblasť vybíjania batérie:

V prípade, že sa odber el. energie nachádza v tejto oblasti dochádza k vybíjaniu batérie, čiže injektovaniu el. energie do záťaže objektu tak, aby došlo k pokrytiu výkonových špičiek. Oblasť nabíjania je ohraničená regulačnými charakteristikami z hora X (zelená) a zdola N (červená). Obe charakteristiky sú nastaviteľné podľa osi y v oboch smeroch v ľavej časti charakteristiky. Charakteristiky na pravej strane sú statické a to z dôvodu, že sa jedná o maximum odberu el. energie. Batéria je vybíjaná výkonom, ktorý je potrebný na to, aby maximálny trend rastu odberu el. energie bol tvorený charakteristikou N.

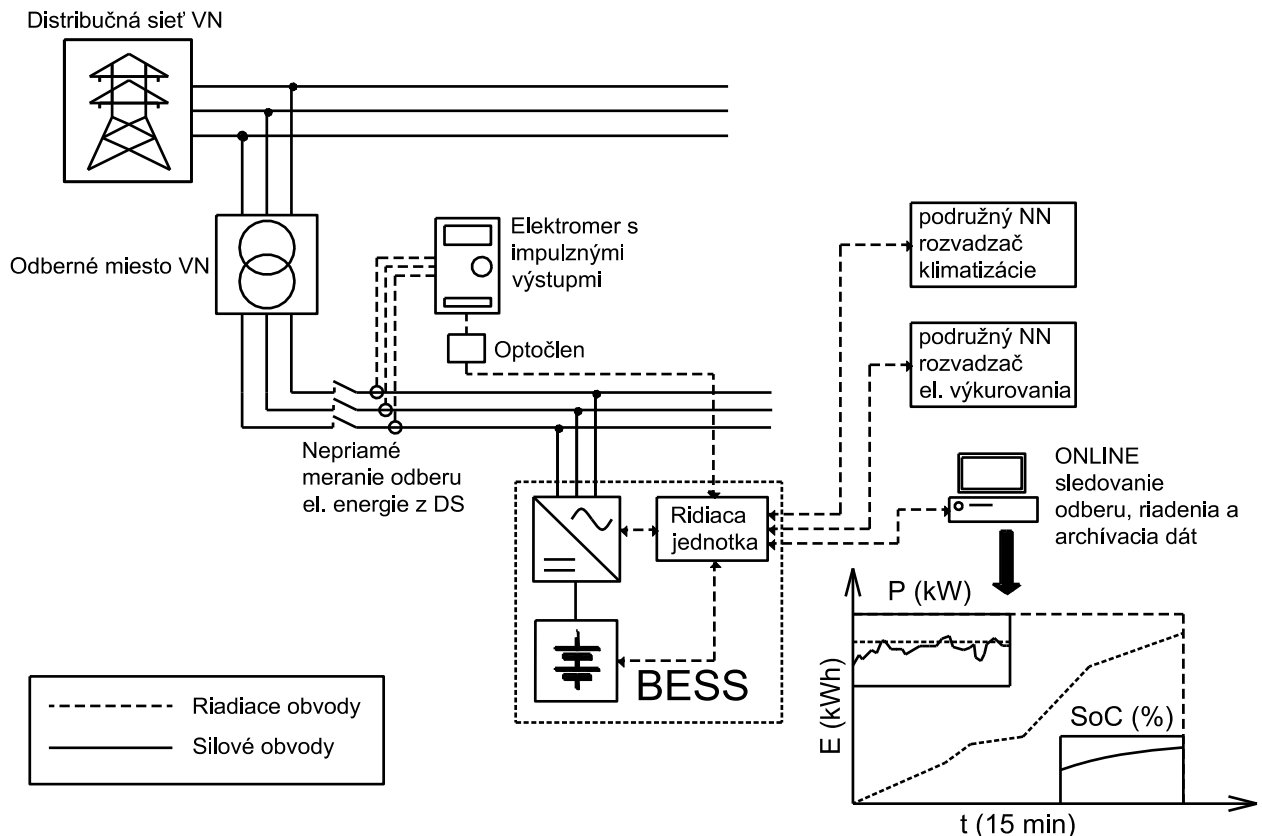
Oblasť odpojenia spotrebičov:

V prípade, že batériové úložisko nedokáže injektovať dostatočné množstvo energie na pokrytie špičkovej spotreby objektu, čím sa odber el. energie v rámci sledovanej štvrt'hodiny dostane nad charakteristiku X, dochádza k postupnému odpájaniu menej dôležitých spotrebičov tak, aby došlo k poklesu rastu energie pod túto hranicu. K opätovnému zapnutiu zariadení dôjde až po poklese pod charakteristiku N.

Hysteréza regulácie:

Jedná sa o ochranné pásmo v prípade, že sa odber el. energie nachádza na hranici prekročenia zmluvnej rezervovanej kapacity. V tomto prípade je nutné brať v úvahu odozvu regulačného systému v rátane invertora (hysterézu) tak, aby bolo batériové úložisko schopné začať injektovať požadovaný výkon do záťaže resp. v prípade, že dôjde k odpínaniu záťaží je nutné uvažovať reakčný čas systému. Táto oblasť ohraničená charakteristikou P (fialová) z hora a je nastaviteľná podľa osy y na základe potrebnej regulačnej rezervy od hodnoty maximálnej hodnoty energie stanovenej na základe rezervovanej kapacity objektu. Regulačnú rezervu je možné vytvoriť tým, že batériové úložisko bude pracovať s hodnotou rezervovanej kapacity poníženou práve o hysterézu regulácie.

### 6.1.2 Návrh zapojenia pre regulačný systém štvrťhodinových maxím



Obr. 6-2 Bloková schéma paralelného zapojenia batériového systému pre aplikáciu peak-shaving.

Návrh zapojenia batériového úložiska pre aplikáciu peak-shaving vychádza zo schémy paralelného pripojenia invertora k hlavnému rozvodu el. energie objektu vid' Obr. 6-2. Táto schéma zapojenia počíta s pripojením na distribučnú sieť vysokého napätia, kde sa fakturačné meranie na rozhraní s odoberateľom realizuje ako nepriame z dôvodu vysokých odoberaných prúdov.

Základnou požiadavkou navrhovaného zapojenia je, že fakturačný elektromer musí disponovať impulznými výstupmi a to buď optickými (LED) alebo spínacími (SO), pomocou ktorých bude možné sledovať priebeh spotreby objektu synchronne s fakturačným meraním objektu. Tieto impulzné výstupy elektromeru indikujú počiatok sledovanej štvrťhodiny v rámci rezervovanej kapacity a taktiež odoberaný výkon v čase. V rámci využitia fakturačného elektromeru k zisku informácií o priebehu spotreby objektu je nutné inštalovať optočlen, ktorý umožní odčítanie informácií a zaistí bezpečné oddelenie medzi technológiou distribútora el. energie a odoberateľa.

Informácie z elektromeru budú odosielané do riadiacej jednotky, ktorá bude sledovať vývoj spotreby el. energie objektu a vyhodnocovať použitie batériového úložiska pre nabíjanie resp. vybíjanie podľa nastavených regulačných charakteristík vid' kap. 6.1.1. Taktiež bude vytvorené riadiace prepojenie na stykače v podružných NN rozvadžačoch, ktoré budú v prípade potreby odopínať/pripájať vybrané zariadenia.

Riadiaca jednotka bude prepojená s jedným alebo viacerými PC cez intranet alebo internet. Jednotlivé PC môžu byť rozdelené do skupín s rôznym stupňom prístupu k nastaveniam riadiacej jednotky. PC softvér komunikujúci s riadiacou jednotkou bude ponúkať zobrazenie priebehu spotreby el. energie v sledovanej štvrťhodine, odoberaného výkonu a SoC batérie v čase, stav spínaných zariadení, finančnú analýzu a i.

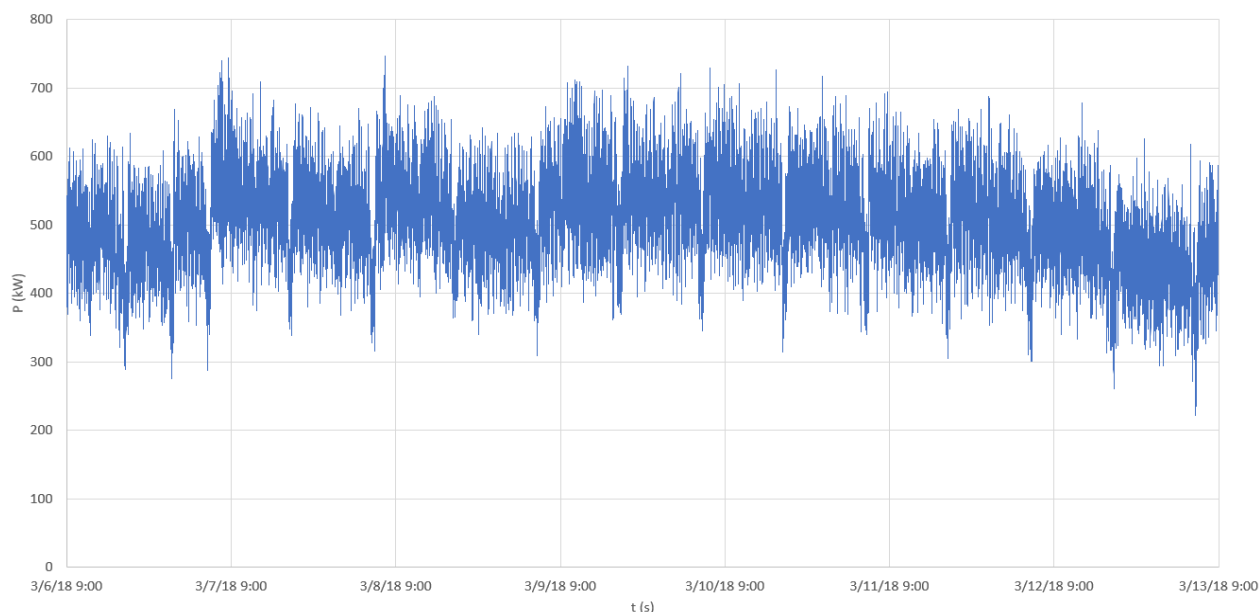
## 6.2 Analyzované dáta

Pre účely návrhu riadiacej logiky a následnej možnosti validácie navrhnutého modelu je potrebné analyzovať dáta s násobne väčšou presnosťou, ako s ktorou pracuje navrhnutý simulačný model. Navrhnutý model je primárne určený k výpočtom vychádzajúcich zo štvrt' hodinových maxím spotreby objektu. V rámci analýzy štvrt' hodinových maxím sa nevyhodnocuje priebeh spotreby objektu počas tohto časového intervalu, ale pracuje iba s konečnou hodnotou nameraného priemerného výkonu, čo vedie k možnému riziku. Toto riziko je spôsobené rôznymi možnosťami vývoja spotreby el. energie objektu, na ktoré musí batériový systém reagovať. Z tohto dôvodu boli ako vhodné pre analýzu týchto stavov zvolené dáta s intervalom merania jednej sekundy, ktorý by mal byť pre overenie funkčnosti navrhovanej logiky a následnej validácie modelu dostačujúci.



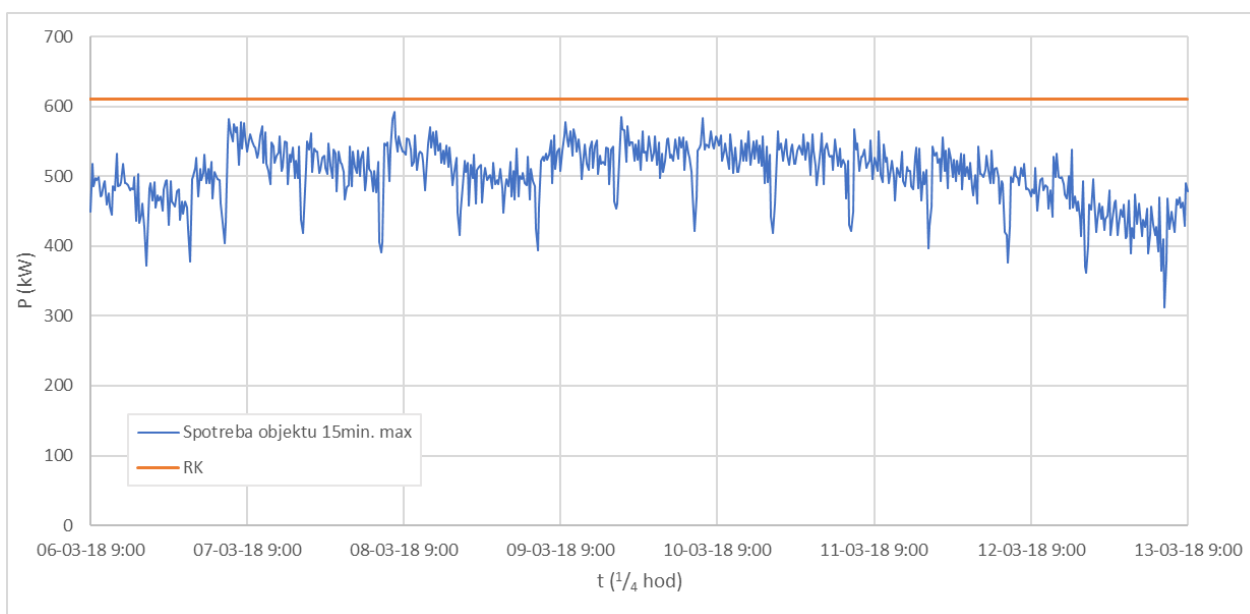
Obr. 6-3 Osadenie merania v trafostanici riešeného objektu.

Na Obr. 6-3 je možné vidieť osadenie merania činného výkonu v trafostanici riešeného objektu na strane nízkeho napätia. Toto meranie bolo realizované analyzátorom kvality siete CHAUVIN ARNOUX C. A 8336, ktorý umožnil zaznamenávanie odberu činného výkonu riešeného objektu v požadovaných sekundových intervaloch počas doby merania 7 dní od 6.3.2018 do 13.3.2018. Meraný odoberaný výkon bol zaznamenávaný v jednotlivých fázach a následne prepočítaný na celkový odoberaný výkon objektu v jednotlivých sekundách. Výsledné dáta boli poskytnuté v neupravenej forme importované do výpočtového programu Excel.



Obr. 6-4 Odoberaný výkon objektu meraný v sekundových intervaloch.

Graficky spracované hodnoty meraného odberu výkonu objektu v sekundových intervaloch je možné pozorovať na Obr. 6-4. Najvyšší odoberaný výkon dosiahol hodnoty 746 kW.



Obr. 6-5 Štvrťhodinový priemerný výkon objektu počas doby merania.

Na Obr. 6-5 je znázornený priebeh štvrťhodinových maxim, ktoré boli vypočítané z meraných hodnôt vid'. Obr. 6-4. Z dôvodu veľkého počtu meraných dát (cca 600 000) bolo nutné pre prepočet na štvrťhodinové maximá vytvoriť skript vo výpočtovom programe Matlab:

```
P_data = xlsread('result.xlsx','H');

P_data1= numel(P_data);
t = 3600;
if(t>4)
    t1 = t/4;
s=1;
```



```

r=1;
P_data_new=0;

for i=1:1:numel(P_data)

    if (s<t1)
        P_data_new(r) = P_data_new(r)+ P_data(i);
        s=s+1;
    elseif (s==t1)
        P_data_new(r) = P_data_new(r)+ P_data(i);
        s=1;
        r=r+1;
        P_data_new(r)=0;
    end
end

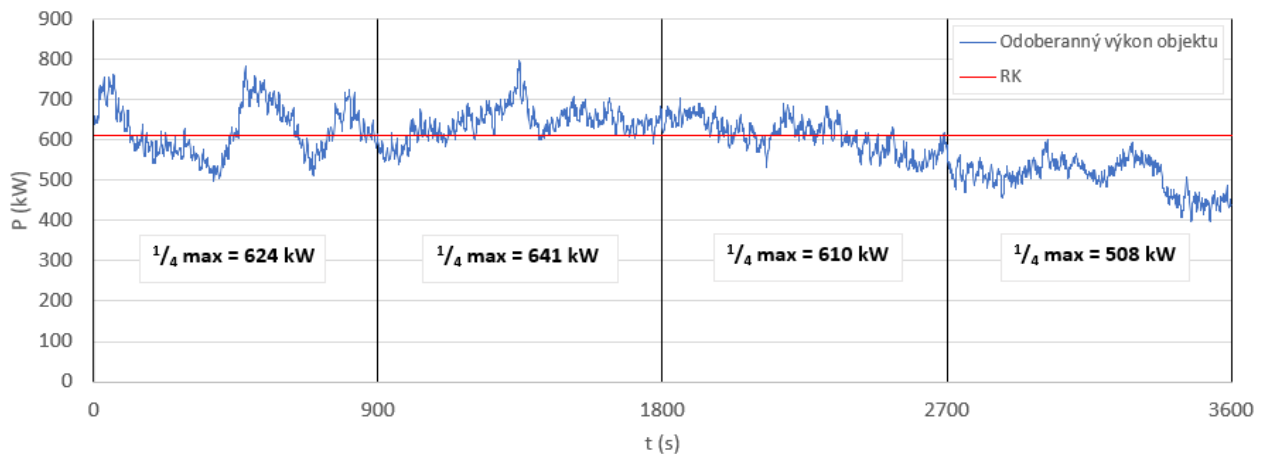
P_data = P_data_new/(t/4)*1000;
end

```

Z vyobrazených hodnôt na Obr. 6-5 môžeme pozorovať, že v rámci meraného obdobia od 6.3.2018 do 13.3.2018 nedošlo k prekročeniu zmluvnej rezervovanej kapacity objektu. Najvyšší odoberaný štvrťhodinový výkon dosiahol hodnoty 592 kW.

### 6.3 Validácia simulačného modelu na základe návrhu riadiacej logiky

V tejto časti práce bude posudzovaná správnosť simulačného modelu navrhovaného v kap.5 *Model batériovej aplikácie peak-shaving* so zameraním na konkrétny návrh kap. 5.2.2 *Prípadová štúdia – A*. Pre overenie simulačného modelu boli použité namerané sekundové dáta príkonu riešeného objektu v rámci hodiny.



Obr. 6-6 Odoberaný výkon objektu v rámci hodiny počas doby najväčšieho využitia batériového úložiska na základe štvrťhodinových maxím z roku 2016.

Pre možnosť dôkladnejšieho overenia funkčnosti návrhu batériového úložiska z kap. 5.2.2, ktorý bol vytvorený na základe štvrťhodinových maxím riešeného objektu, budú pre verifikáciu a návrh riadiacej logiky použité merané sekundové hodnoty odoberaného výkonu v rámci sledovanej hodiny prepočítané na hodnoty maximálneho štvrťhodinového odberu podľa Obr. 5-9 pre rok 2016.

V rámci verifikácie bola pre analýzu zvolená hodina, kedy došlo k najväčšiemu využitiu batériového systému v poradí s nasledujúcimi hodnotami štvrt' hodinových maxím: 624 kW, 641 kW, 610 kW a 508 kW vid'. Obr. 6-6.

#### Vstupné informácie:

Overenie simulačného modelu je realizované na základe návrhu riadiacej logiky z kap. 6.1-*Návrh riadiacej logiky pre batériovú aplikáciu peak-shaving*. Pre overenie bol vypočítaný kumulatívny priebeh odberu el. energie objektu (čierna čiarkovaná čiara) na základe nameraných odoberaných výkonov objektu v sekundových intervaloch. V rámci overenia sú rešpektované nasledujúce parametre batériového úložiska:

- Kapacita batériové úložiska 65 kWh
- Výkon invertorov 45 kW
- Účinnosť batérie 92 %
- Účinnosť invertora 94 %
- Maximálnu hodnotu nabitia batérie (90 %) a minimálnu hodnotu vybitia batérie (10 %)

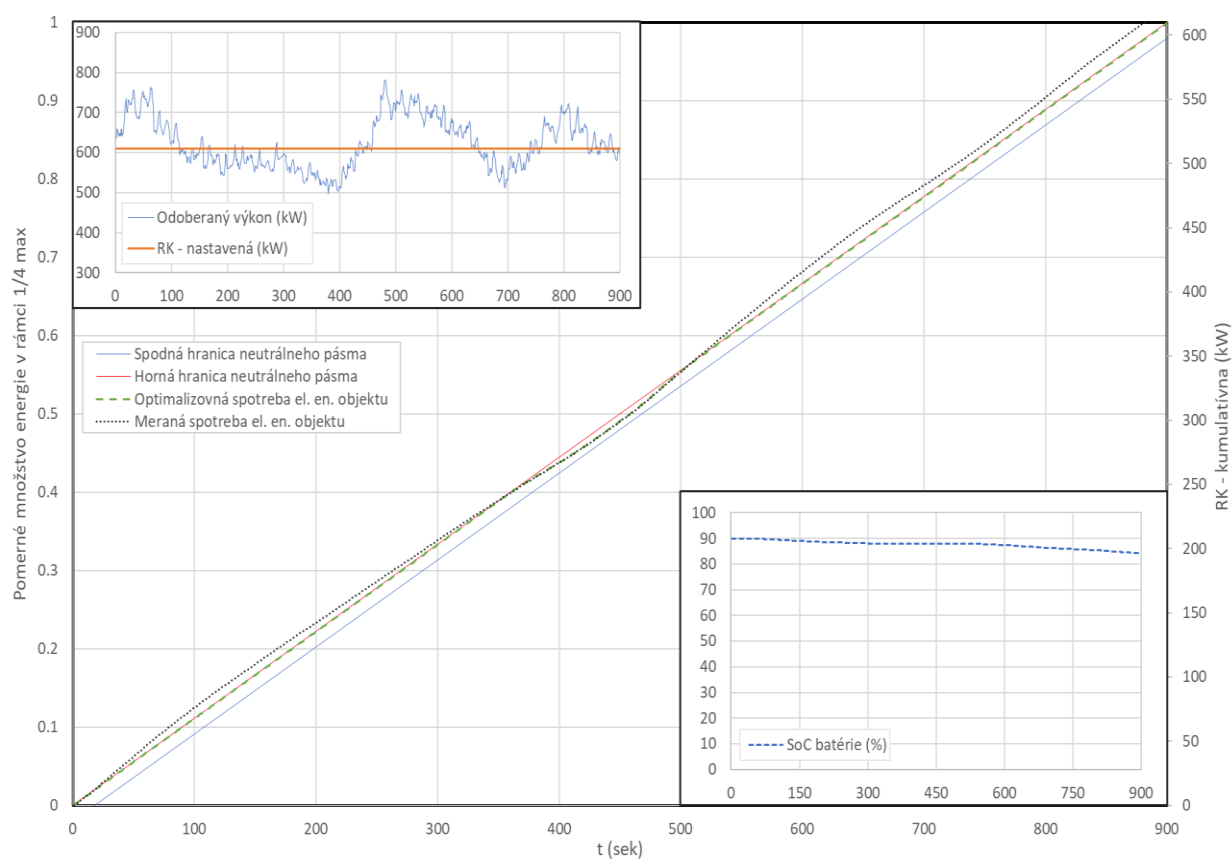
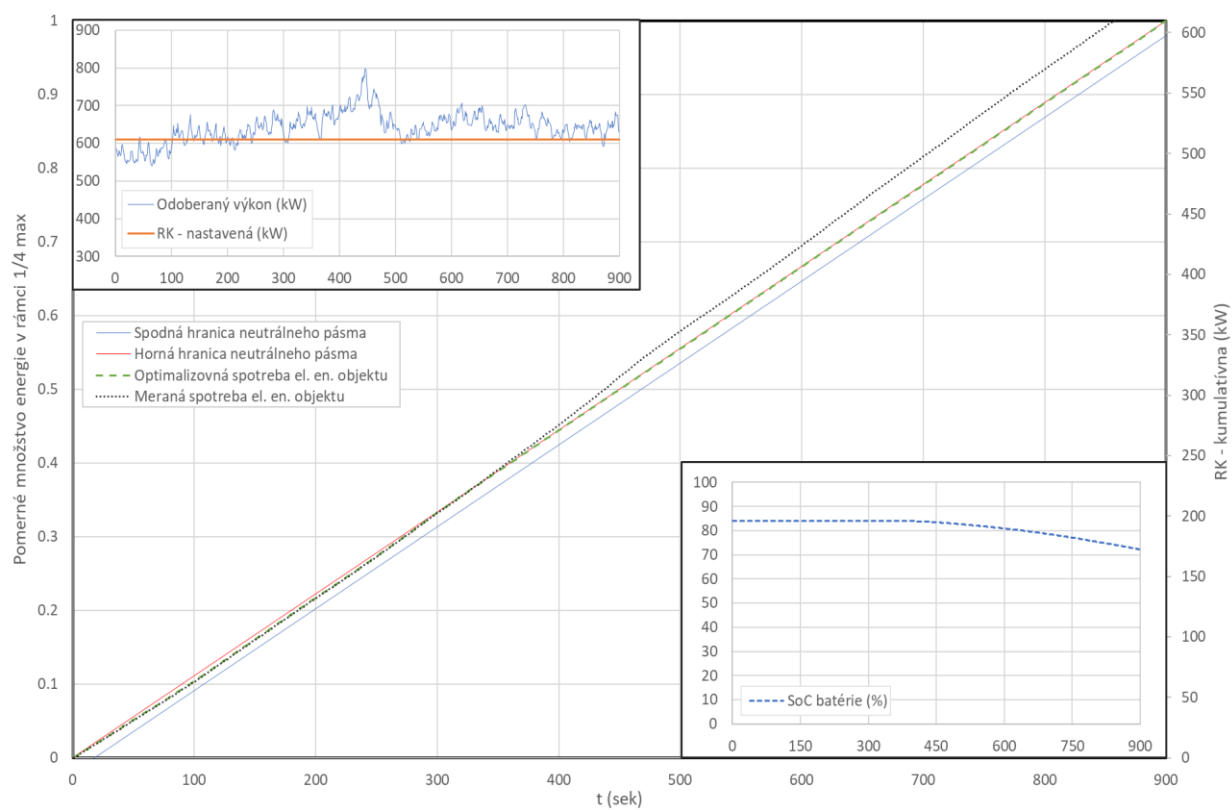
V rámci overenia navrhovaného simulačného modelu nie sú uvažované nasledujúce vplyvy:

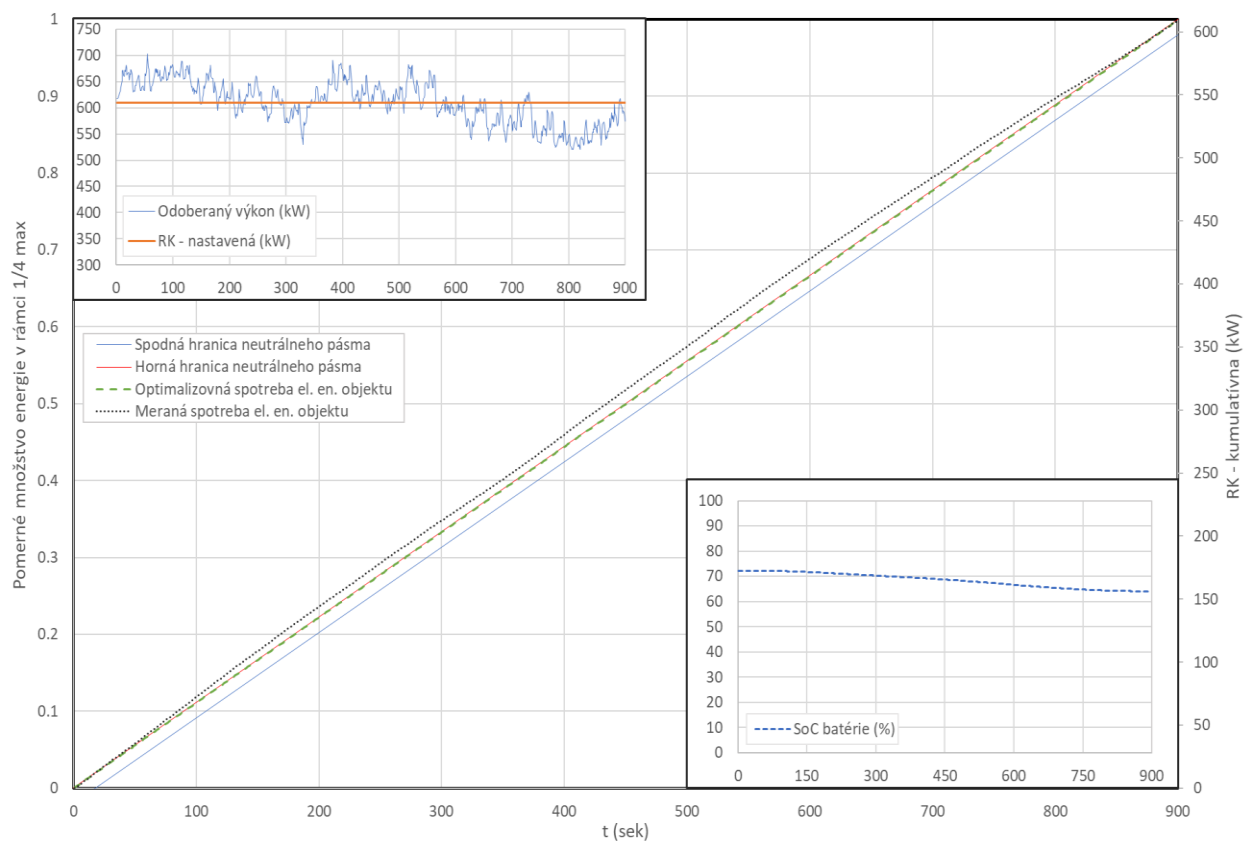
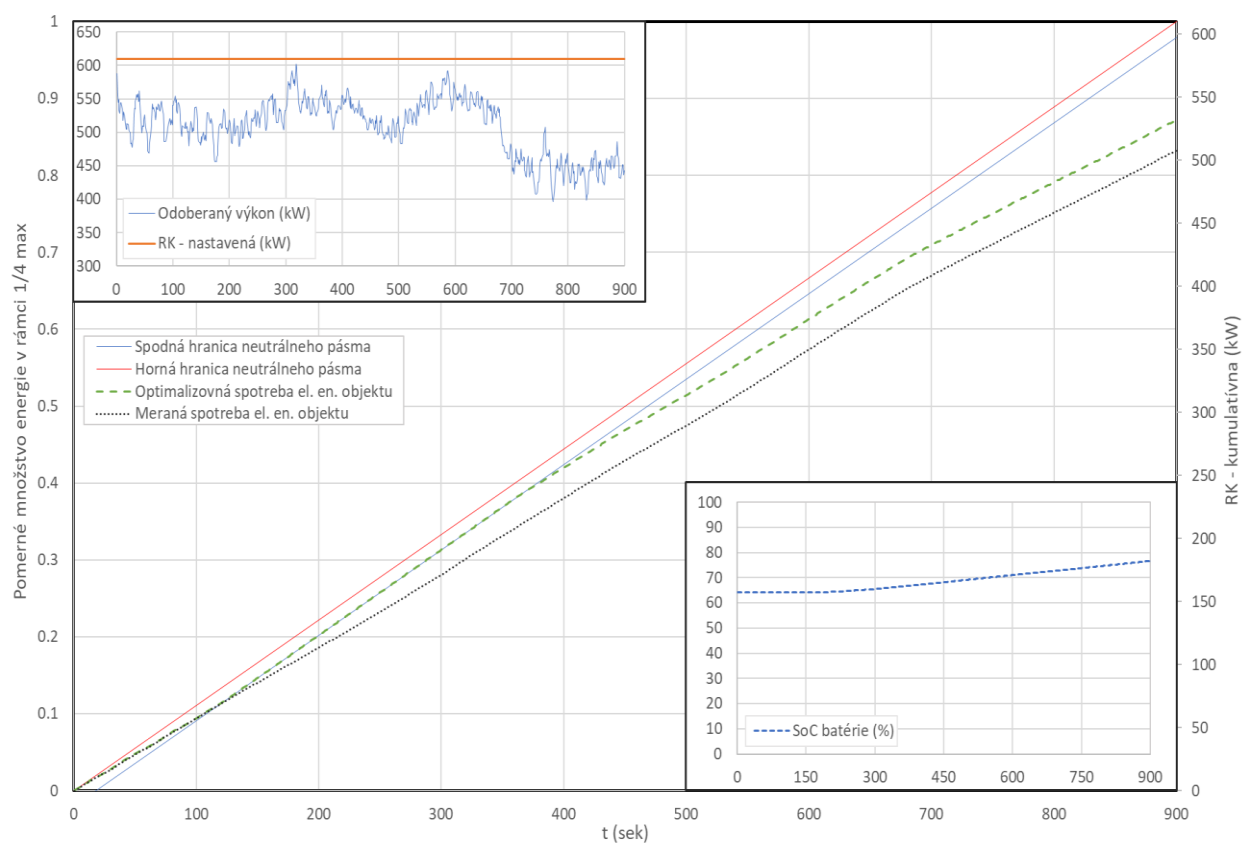
- Tranzientné stavy invertora
- Trainzientné stavy batérie
- Vplyv teploty batériového systému
- Reakčné časy batériového systému

Uvedené vplyvy boli zanedbané na základe ich malého významu v rámci tohto overenia, značnej zložitosti a časovej náročnosti na ich implementáciu.

#### Popis a nastavenie regulačných charakteristík:

Graf regulácie štvrt' hodinového maxima je tvorený troma vzájomne previazanými grafmi podľa časovej osi vid' (900 sekúnd) Obr. 6-7. Prvý graf (vľavo hore) zobrazuje odoberaný výkon riešeného objektu v rámci štvrt' hodiny. Druhý graf v (vpravo dole) zobrazuje aktuálne SoC batérie v čase. Tretí hlavný graf (stred) obsahuje 2 osi y, ktoré sú vzájomne prepojené podľa maxima pomernej energie (primárna os) a nastavenej rezervovanej kapacity objektu 610 kW (sekundárna os). Ďalej sú v tomto grafe znázornené regulačné charakteristiky (zjednodušené), ktoré ohraničujú neutrálne pásmo regulácie. Horná regulačná charakteristika (červená) bola nastavená podľa maxima priebehu rezervovanej kapacity, čiže nedochádza k oddialeniu vybíjania batérie na začiatku meranej štvrt' hodiny. Oddialenie vybíjania z počiatku sledovanej štvrt' hodiny by mohlo viesť k vyšším vybíjajúcim prúdom v závere štvrt' hodiny. Spodná regulačná charakteristika (modrá) je posunutá voči hornej charakteristike nižšie a to z dôvodu, aby sa zabránilo okamžitým prechodom z nabíjania do vybíjania batérie a naopak. Táto charakteristika ďalej slúži na to, aby udržiavala odber objektu navýšený o výkon potrebný na nabíjanie batérie pod hranicou rezervovanej kapacity.

Grafické výsledky:Obr. 6-7 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre  $\frac{1}{4} \text{ max} = 624 \text{ kW}$ .Obr. 6-8 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre  $\frac{1}{4} \text{ max} = 641 \text{ kW}$ .

Obr. 6-9 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre  $\frac{1}{4} \text{ max} = 610 \text{ kW}$ Obr. 6-10 Optimalizácia spotreby v rámci aplikácie peak-shaving pre  $\frac{1}{4} \text{ max} = 508 \text{ kW}$ .

Zhodnotenie grafických výsledkov:**Štvrťhodinové maximum 624 kW**

V rámci sledovanej štvrťhodiny došlo k prekročeniu rezervovanej kapacity objektu o 14 kW. Batéria kontinuálne injektovala výkon do záťaže dva krát počas sledovanej štvrťhodiny a to v začiatku, následne došlo k poklesu spotreby do neutrálnej oblasti regulácie v 300. sekunde, kde optimalizovaná spotreba kopírovala priebeh reálnej spotreby, a následne batéria opäť začala dodávať energiu v 500. sekunde, táto injektáž trvala do konca sledovanej štvrťhodiny vid' Obr. 6-7. Celková energia injektovaná z batérie činí 4 kWh vrátane strát batérie a invertora, tomu odpovedá pokles SoC batérie o 6 % na hodnotu 84 % v priebehu sledovanej štvrťhodiny. V rámci optimalizácie spotreby regulačnými charakteristikami aplikácie peak-shaving došlo k úplnému pokrytiu špičkovému odberu, ktorý presiahol hodnotu rezervovanej kapacity. Pri porovnaní s Obr. 5-12 môžeme sledovať, že pokles SoC odpovedá analyzovanej štvrťhodine na základe sekundových dát.

**Štvrťhodinové maximum 641 kW**

V rámci sledovanej štvrťhodiny došlo k najväčšiemu prekročeniu rezervovanej kapacity za analyzovaný rok 2016 a to o 31 kW. Na Obr. 6-8 môžeme pozorovať, že došlo ku kontinuálnemu vybíjaniu batérie do záťaže od 330. sekundy sledovanej štvrťhodiny z dôvodu výkonového profilu, ktorý bol odoberaný počas sledovanej štvrťhodiny. Celková energia injektovaná z batérie činí približne 8,8 kWh vrátane strát batérie a invertora, tomu odpovedá pokles SoC batérie o 13 %. Na zobrazení SoC batérie môžeme pozorovať, že od 750. sekundy dochádza k vybíjaniu vyšším než optimálnym C-rate batérie (1C) tak, aby došlo k úplnej optimalizácii spotreby a nemuseli byť odpojené záťaže odberateľa. Možnosť preťaženia batérie závisí od konkrétneho typu, pre overenie možnosti preťaženia batérie pri vyššom než optimálnom C-rate bolo uskutočnené meranie batérie BYD 2560 Wh v laboratóriu obnoviteľných zdrojov VUT vid' Tab. 6-1 Na základe tohto merania je možné konštatovať, že v batérii, ktorá bola objektom merania nedôjde pri napájaní záťaže prúdovým pomerom 1C k poruche jej preťažením.

Tab. 6-1 Vybíjanie batérie BYD 2560 Wh do záťaže

AC Záťaž	DC (W)	AC (W)	Účinnosť (%)	Čas do poruchy
2500W	2670 => 1,1C	2489	93,27	-
3000W	3207 => 1,28C	2989	93,18	-
3300W	1,32C			<300s
4000W	1,7C			<1s

Na základe tohto poznatku je vhodné pre batériovú aplikáciu peak-shaving voliť batérie s možnosťou preťaženia.

S preťažením batérie 1,1C je spojené taktiež preťaženie navrhovaného invertora, ktoré bude v tomto prípade činiť 1,6 násobok jeho nominálneho výkonu po dobu približne 150 sekúnd. Z tohto dôvodu je vhodné pre aplikáciu peak-shaving využívať inventory s vyššou preťažiteľnosťou. Pretože výpočet nezohľadňuje vybíjanie batérie s vyšším než optimálnym C-rate je vhodné voliť vyššiu rezervu invertora pri návrhu batériového úložiska. Pri porovnaní s Obr. 5-12 môžeme sledovať, že pokles SoC odpovedá analyzovanej štvrťhodine na základe sekundových dát.

**Štvrťhodinové maximum 610 kW**

V sledovanej štvrťhodine nedošlo k prekročeniu rezervovanej kapacity objektu. V porovnaní s návrhom na štvrťhodinových maximách, ktorý počítal s tým, že žiadna energia do záťaže nebude dodaná, dochádza v rámci overenia na sekundových dátach k injektáži približne 5 kWh el. energie z batérie, čo odpovedá poklesu SoC o 8 % na 64 % vid'. *Obr. 6-9* Injektáž el. energie z batérie do záťaže je spôsobená prekročením nastavenej charakteristiky. Zvýšením hornej hranice neutrálneho pásma je možné nevyžiadajú injektáž obmedziť, čo by však na druhú stranu viedlo k skráteniu času potrebného na injektáž energie a tým pádom by batéria musela pracovať s vyšším prúdovým pomerom.

**Štvrťhodinové maximum 508 kW**

Vývoj odberu el. energie v tejto štvrťhodine je od počiatku hlboko pod hranicou prekročenia rezervovanej kapacity. Po prekročení spodnej hranice neutrálneho pásma približne v 100. sekunde dochádza k nabíjaniu batérie s obmedzením na maximálny výkon invertora zo 64 % SoC na hodnotu 77 % ,dodaná energia je približne 8,5 kWh. V porovnaní s návrhom na štvrťhodinových maximách, kedy došlo k nabitíu o 17 % SoC batérie (11,3 kWh) je rozdiel získaný analýzou sekundových dát spôsobený obmedzením nabíjania regulačnou charakteristikou vid'. *Obr. 6-10*.

## 7 ZÁVER

Táto diplomová práca na úvod ponúka čitateľovi oboznámenie sa s jednotlivými možnosťami akumulácie elektrickej energie, ktorých základný popis je uvedený v druhej kapitole. Táto kapitola taktiež ponúka prehľad o využití jednotlivých akumulačných princípov na základe evidovaných projektov v globálnej databáze energetických úložísk.

Na predošlú kapitolu nadväzuje kapitola venujúca sa detailnejšej analýze elektrochemickej akumulácie, ktorá sa v súčasnosti javí ako vhodná pre použitie v priemyselných objektoch. Obsahom kapitoly je popis jednotlivých perspektívnych elektrochemických akumulátorov so zameraním na lítiové akumulátory a ich vzájomné porovnanie.

Štvrtá kapitola poukazuje na možnosti využitia batériových systémov pre aplikácie v rámci elektrizačnej sústavy so zameraním na aplikácie vhodné pre koncového zákazníka. Na základe poznatkov plynúcich z teoretického základu tejto kapitoly autor práce považuje aplikáciu peak-shaving ako vhodnú pre optimalizáciu spotreby elektrickej energie priemyselného objektu.

Praktická časť tejto diplomovej práce sa v prvom bode venuje návrhu simulačného modelu batériový systém s technológiou Li-ion pre aplikáciu peak-shaving vo výpočtovom programe Matlab. Navrhnutý simulačný model vytvára technicko-ekonomickú analýzu na základe vstupných údajov uvedených v *kap.5.1.1*. Pridanou hodnotou vytvoreného simulačného modelu je automatický návrh minimálnej kapacity a výkonu batériového systému, ktoré sú potrebné na pokrytie vzniknutých výkonových špičiek. Ak užívateľ nezvolí automatický výpočet a v rámci výpočtu dôjde k prekročeniu nastavenej rezervovanej kapacity, čiže spotreba objektu nebude plne optimalizovaná, dôjde na konci výpočtu k zobrazeniu informatívnej chybovej hlášky o tom, ktorý prvok batériového systému nie je dostatočne dimenzovaný.

V rámci overenia správnosti simulačného modelu boli s jeho využitím vytvorené dve prípadové štúdie A a B, ktoré boli spracované pre konkrétny priemyselný objekt na základe poskytnutých štvrťhodinových maxím za rok 2016. V prípadovej štúdií A bolo využité batériové úložisko v aplikácii peak-shaving tak, aby nedošlo k prekročeniu stávajúcej rezervovanej kapacity objektu. Na základe výsledkov prípadovej štúdie A v *Tab. 5-2* je možné konštatovať, že aj keď projekt na konci svojej životnosti vykazuje kladnú hodnotu NPV s dobou návratnosti približne 15 rokov sa v súčasnosti nebude javiť pre investorov ako zaujímavý. Prípadová štúdia B pracuje s myšlienkou celkového zníženia rezervovanej kapacity riešeného objektu, čo by viedlo k značnej úspore na platbách za el. energiu. Z výsledkov prípadovej štúdie B vid'. *Tab. 5-3* je zrejmé, že takéto využitie aplikácie peak-shaving nie je pri súčasných cenách batériových systémov ekonomicky prijateľné. Ekonomický výsledok batériovej aplikácie peak-shaving zo štúdie B sa odvíja od investície potrebnej na zníženie 1 kW rezervovanej kapacity v porovnaní s aktuálnou platbou za rezervovanú kapacitu podľa cenového rozhodnutia ERÚ.

Hlavným úskalím batériovej aplikácie peak-shaving je nutnosť krátkodobej injekcie veľkého výkonu do záťaže objektu, pričom využitie kapacity batérie je minimálne, čo má za následok značný počiatočný investičný náklad na takýto systém. Ako bolo uvedené v úvode tejto práce cena batérií na trhu má výrazne klesajúci trend, avšak aktuálna cena je stále pomerne vysoká v porovnaní s vytvorenou úsporou nákladov na prevádzku priemyselného objektu.

K zlepšeniu ekonomického výsledku projektu by mohlo dôjsť v prípade využitia batériového úložiska pre viaceré batériové aplikácie súčasne, kedy by bola pre jednotlivé aplikácie vyhradená kapacita batérie, s ktorou by mohla daná aplikácia pracovať. Čím je myslené, že aplikácia peak-shaving by nemusela byť primárnou batériovou aplikáciou priemyselného objektu, ale aplikáciou

doplnkovou, ktorá by vo výsledku mala kladný ekonomický prínos na projekt batériového úložiska. Ďalšou možnosťou pre zlepšenie ekonomického výsledku aplikácie peak-shaving sa ponúka možnosť čerpania dotačných titulov pre znižovanie náročnosti objektov alebo úspory energií, ako napríklad aktuálne otvorený dotačný titul OPPIK (operační program podnikání a inovace pro konkurenceschopnost), ktorý je vedený pod záštitou MPO (ministerstvo průmyslu a obchodu).

V ďalšom bode praktickej časti sa práca venuje návrhu riadiacej logiky, ktorá by mohla byť využiteľná pre správnu funkcionálnu batériovej aplikácie peak-shaving. Navrhnutá riadiaca logika funguje na princípe regulačných charakteristík, kde je sledovaný vývoj odberu elektrickej energie. V rámci tohto bodu bola popísaná možnosť prevedenia zapojenia batériového systému pre priemyselný objekt a princíp synchronizácie vyhodnocovaných údajov.

Posledným bodom praktickej časti bola verifikácia simulačného modelu pomocou navrhutej riadiacej logiky, pre ktorej účely bolo realizované meranie priebehu odoberaného výkonu v sekundových intervaloch na riešenom objekte z prípadovej štúdie A. Verifikácia bola porovnávaná s prípadovou štúdiou A, preto došlo k úprave sekundových dát tak, aby nadobudli hodnotu štvrt' hodinových maxím, v rámci ktorých došlo v prípadovej štúdií A k najväčšiemu využitiu batériového systému. Na základe verifikácie je možné konštatovať správnosť simulačného modelu, pričom odchýlky sú spôsobené hlavne vplyvom regulačných charakteristík.

Z výsledkov vyhodnocovaných priebehov najväčšieho využitia batérie za rok 2016 je nutné uviesť, že pre batériovú aplikáciu peak-shaving s navrhovanou riadiacou logikou regulačnými charakteristikami je vhodné voliť technológiu s možnosťou vysokého výkonového preťaženia.

V rámci návrhu batériového úložiska pre konkrétny objekt je potrebné rešpektovať fakt, že reálny profil spotreby objektu neodpovedá meranému štvrt' hodinovému maximu, a preto v prípade návrhu pomocou simulačného modelu na základe štvrt' hodinových maxím je nutné dimenzovať batériový systém s dostatočnou výkonovou rezervou.

Pre zlepšenie presnosti návrhu simulačného modelu batériovej aplikácie peak-shaving by bola možnosť vytvorenia databázy, ktorá by disponovala nameranými sekundovými profilmi odberu, ktoré by boli v rámci výpočtu náhodne pridelené k hodnote štvrt' hodinového maxima a následne prepočítané na základe priemernej hodnoty. Využitím sekundových dát by došlo k zlepšeniu presnosti návrhu batériového úložiska, avšak podstatne by vzrástli požiadavky na výpočtový výkon.



## POUŽITÁ LITERATÚRA

- [1] RADIL, L.; BARTOŠÍK, T.; MASTNÝ, P. *Problems of Wind Power Plants from Point of View of Grid*. In Energy Problems and Environmental Engineering, WSEAS e-journal Energy and Environment. Energy and Environmental Engineering Series. University of La Laguna, Tenerife, Spain, WSEAS Press. 2009. p. 369 - 373. ISBN 978-960-474-093-2, ISSN 1790-5095.
- [2] *Thermal Energy Storage: IEA-ETSAP and IRENA © Technology Brief E17 – January 2013* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.irena.org/>.
- [3] RADIL, L.; MACHÁČEK, J. *Nekonvenční přeměny energie*, Elektronický učební text. Vysoké učení technické, Brno, Česká republika, 2016, [cit. 2017-10-15],
- [4] JESTŘÁB, T. *Vliv akumulace na provoz distribuční sítě*. Diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 70 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
- [5] *Electricity storage and renewables: Costs and markets to 2030 – Október 2017* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.irena.org/>.
- [6] *DOE Global Energy Storage Database: Office of Electricity Delivery & Energy Reliability* [online]. [cit. 2017-10-15]. Dostupné z: <https://www.energystorageexchange.org/>
- [7] DOC. ING. JIŘÍ HAMMERBAUER, Ph.D. Olověné akumulátory [online]. 2009 [cit. 2017-10-17]. Dostupné z: <https://www.jergym.cz/>.
- [8] Radil, L. *Eliminace diskontinuity dodávky elektrické energie z obnovitelných zdrojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 166 s. Vedoucí dizertační práce doc. Ing. Petr Mastný, Ph.D.
- [9] NiCd akumulátory, BATTEX [online] 2009-2017. [cit. 2017-10-21]. Dostupné z: <https://www.battex.info/>.
- [10] Overview of current development in electrical energy storage technologies and application potential in power systems operation, *ScienceDirect* [online], January 2015. [cit. 2017-10-21]. Str. 511-536, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [11] M.A. Fetcenko, S.R. Ovshinsky, B. Reichman, K. Young, C. Fierro, J. Koch, *et al. Recent advances in NiMH battery technology*, J Power Sources, 165 (2007), [cit. 2017-10-21], str. 544-551, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [12] T. Ying, X. Gao, W. Hu, F. Wu, D. Noreus. *Studies on rechargeable NiMH batteries*, Int J Hydrogen Energy, 31 (2006), [cit. 2017-10-21], str. 525-530, Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/>.
- [13] Energy Storage Association [online]. Washington (USA): ESA, 2016 [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <http://energystorage.org/>
- [14] Ivan Rexed, Mårten Behm, Göran Lindbergh, *Modelling of ZEBRA*, KTH OCH KONST: ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY. [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://www.kth.se/>
- [15] J. PRAKASH, L. REDEY, P. A. NELSON, D. R. VISSERS, *High-Temperature Sodium Nickel Chloride Battery for Electric Vehicles*, Electrochemical technology program, Argonne National Laboratory, [online]. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://www.otis.gov/>
- [16] Histórie Li-akumulátorov, BATTEX [online] 2009-2017. [cit. 2017-10-22]. Dostupné z: <https://www.battex.info/>.

- [17] THURNER, H. *Battery Storage Systems for Electricity Technology, Applications and Economics of large Projects in Central and Eastern Europe*. Master of Science. Wien: Technical University, 2016. 92 s. Supervised by Univ. Prof. Dr. Dipl. – Ing Reinhard HAAS
- [18] Advantages of Primary Batteries, BATTERY UNIVERSITY [online]2017.[cit. 2017-11-3]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>.
- [19] JAŠŠO, K. *Vliv lisovacího tlaku na elektrochemické vlastnosti elektrod pro akumulátory Li-S*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 70 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Kazda, Ph.D..
- [20] Ana-Irina Stan, Maciej Świerczynski, Daniel-Ioan Stroe, Remus Teodorescu, Søren Juhl Andreassen. *Energy Storage to Automotive and Back-up Power Applications – An Overview*. Department of Energy Technology, Aalborg University, Denmark. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/>
- [21] Flow batteries, ENERGY STORAGE [online]2017.[cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://energystorage.org/>.
- [22] Piergiorgio Alotto, Massimo Guarnieri, Federico Moro. *Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review*. Dipartimento di Ingegneria Industriale, Università di Padova, via Gradenigo 6/A, Padua 35131, Italy. [online]2014.[cit. 2017-11-16]. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/>
- [23] Xing Xie, *Vanadium Redox-Flow Battery*. Online course 2011. Stanford University [cit. 2017-11-16]. Dostupné z : <http://large.stanford.edu/>
- [24] JIŘÍ PTÁČEK. *Modulární systémy ABB pro skladování energie* [online].2017[cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <https://new.abb.com/>.
- [25] Alexandre Oudanov, Rachid Cherkaoui, Antoine Beguin. *Sizing and optimal operation of battery energy storage for peak shaving application*. ABB Switzerland., corporate Research, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1015 Lausanne, Switzerland. [online]2007.[cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [26] Yuanyuan Shi, Bolun Xu, Di Wang, Baosen Zhang. *Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: Joint Optimization for superlinear gains*. University of Washington [online]2007.[cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/>
- [27] *Multi-megawatt power protection at medium voltage*. Magazine POWER – ABB 5/17 [online]2007.[cit. 2018-01-14]. Dostupné z: <https://new.abb.com/>.
- [28] HAVLÍK, D. *Využití bateriových systémů pro poskytování podpůrných služeb*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta Elektrotechnická, 2017. 53s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Šváb.
- [29] Žáček, J. *Zdroje nepřerušovaného napájení – UPS*. Praha: České vysoké učení technické, Fakulta elektrotechnická, [online] 10/2001.[cit. 2018-01-18]. Dostupné z : <https://odbornecasopisy.cz>
- [30] Lithium Battery Failures. *Electropaedia, Energy Sources and Storage and History of Technology* [online]2005.[cit. 16.03.2018]. Dostupné z: <http://www.mpoweruk.com/>
- [31] Li-ion Battery and Gauge Introduction. *Richtek Technology* [online]2015.[cit. 16.03.2018]. Dostupné z: <http://www.richtek.com/>
- [32] How to prolong Lithium-based Batteries, BATTERY UNIVERSITY [online]2018.[cit. 2017-13-3]. Dostupné z: <http://batteryuniversity.com/>.

- 
- [33] Battery Management IC. *Battery Technology Overview* [cit. 16.03.2018] 1995.[online]. Dostupné z: <http://www.ti.com/>.
- [34] MIT Electric Vehicle Team, *A guide to understanding Battery Specifications* [cit. 15.03.2018] 2008.[online]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/>
- [35] Inverter Basics and Selecting the Right Model. *Solar Electric Power Systems For On & Off* [online]. 2018 [cit. 16.03.2018]. Dostupné z: <https://www.solar-electric.com/>
- [36] Vyhláška č. 16/2016 Sb. o podmínkách připojení k elektrizační soustavě.
- [37] Vyhláška č. 408/2015 Sb. ze dne 23. prosince 2015 o Pravidlech trhu s elektřinou.
- [38] Cenové rozhodnutí ERÚ č. 6/2017 ze dne 21. listopadu 2017, kterým se stanovují ceny za související službu v elektroenergetice a další regulované ceny.
- [39] Discount Rate. *Investopedia - Sharper Insight. Smarter Investing.* [online]. 2018. [cit. 16.03.2018]. Dostupné z: <https://www.investopedia.com/>
- [40] Životnost projektu (Life of the project) - *ManagementMania* [online]. 2011 [cit. 16.03.2018]. Dostupné z: <https://managementmania.com/>
- [41] MACHÁČKOVÁ, J. *Hodnocení využití strukturovaných fondů pro rozvoj MSP*. Masarykova univerzita, Ekonomicko-správní fakulta, 2017. 53s. Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Křištof.

## PRÍLOHA – A – SIMULAČNÝ MODEL MATLAB

```

clear;
clc;

P_data = xlsread('Data.xlsx','Data');

%%%% pre minútové dáta - 60; pre 15min dáta- 4; pre hodinové dáta 1; %%%%
t = 4;

%%%% rozsah dát merania %%%%
rozsah_dat = datenum({'01-Jan-2016 00:15';'31-Dec-2016 00:00'});

Out = datevec(rozsah_dat(1):1/(24*t):rozsah_dat(2));

time = datetime (Out);

hodnoty = numel(time);

figure(1)
plot(time,P_data),datetick('x'),xlabel('mesiac'),ylabel('Spotreba (kW)'),title(
'Ročný diagram spotreby');

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Vstupne hodnoty %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Analyzované dáta (1/0)%
data_mesiac = 0;
data_rok = 1;
%%% PRE AUTOMATICKY VYPOCET Automaticky_vypocet = 1; %%%
Automaticky_vypocet = 0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%Automaticky výpočet%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% - (AV)

% Výpočtová rezerva veľkosti kapacity batérie (%) %
Batt_rezerva = 50;
% Výpočtová rezerva veľkosti výkonu invertora (%) %
Inv_rezerva = 50;

%%% Parametre batériového úložiska %%%

% Počiatocna hodnota nabitia (%) %
BESS = 90;

% Min. hodnota vybitia a max. hodnota nabitia batérie (%) %
BESSmin = 10;
BESSmax = 90;

% Maximálny počet cyklov batérie (-) %
max_pocet_cyklov = 6000;

% Kapacita batériového úložiska (kWh) % - nebude rečpektovaná v prípade AV
BESSkapacita = 65;

% Optimálny C-rate batérie pri 20°C (-)%
Crate = 0.7;

% Maximálny výkon invertora (kW) % - nebude rečpektovaná v prípade AV

```

```

Invertor_size = 45;
% Výkon batérie (kW) %
BESSpow=Crate*BESSkapacita;

% Účinnosť technológie batérie %
ucinnost_batt = 92;
% Účinnosť technológie invertora %
ucinnost_str = 94;

%%% Vstupy pre výpočet ekonomiky nasadenia batériového úložiska %%%

%%% Novo zvolená rezervovaná kapacita %%%
% Novo nastavená ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)%
RK_rok = 610;
% Novo nastavená mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)%
RK_mes = 0;

%%% Stávajúca rezervovaná kapacita %%%
% Stávajúca ročná rezervovaná kapacita objektu (kW)%
RK_skut_rok = 610;
% Stávajúca mesačná rezervovaná kapacita objektu (kW)%
RK_skut_mes = 0;

% Diskontná sadzba (%) %
diskont = 5;

% Cena el. energie (Kč/MWh) %
cena_silov_MWh = 952;

% Mesačná cena za ročnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)%
RKcenaMW_rok = 171705;
% Mesačná cena za mesačnú rezervovanú kapacitu (Kč/MW a mesiac)%
RKcenaMW_mes = 191158;

% Pomerný investičný náklad na invertora (Kč/KW)%
invest_kW_inver = 6000;
% Pomerný investičný náklad na batérie (Kč/KWh)%
invest_kWh_batt = 7500;
% Merná investícia ostatných nákladov na jednotku kapacity batérie (Kč/KWh)%
invest_kWh_bat_ostatne = 2000;

% Doba životnosti projektu %
dobazivota = 17;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Výpočet %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

RK =RK_rok+RK_mes;
RK_skut = RK_skut_rok+RK_skut_mes;

if (data_mesiac>1)&&(data_rok>1) || (data_mesiac==0)&&(data_rok==0)
error('Nutné zvoliť rozsah dát');
end

if (Automaticky_vypocet >0 )&&(RK >= max(P_data))&&(RK_skut>=max(P_data)) ||
(RK >= max(P_data))&&(RK_skut < max(P_data))
error('Nedochádza k využitiu BESS alebo optimalizácii spotreby objektu ');
end

```

```

if (BESS > BESSmax)
BESS = BESSmax;
end

if (BESS < BESSmin)
BESS = BESSmin;
end

BESS_E = (BESS/100)*BESSkapacita;
pomer_inv_batt = Invertor_size / BESSpow;
pocet_chyb_inv = 0;

% Automatický návrh batériového úložiska %
if (Automaticky_vypocet > 0 )

BESSkapacita = 0;
Invertor_size = 0;

o=0;
k=0;
l=0;

F=1;
while (F>0)

pomer_inv_batt = Invertor_size / BESSpow;

for i = 1:hodnoty

    %pom1
    BESS_E_help1 = BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t;
    BESS_help1 = (BESS_E_help1/BESSkapacita)*100;
    pomocna_1 = (RK-P_data(i))/t;

    %pom2
    BESS_E_help2 = BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t;
    BESS_help2 = (BESS_E_help2/BESSkapacita)*100 ;
    pomocna_2 = abs(P_data(i)-RK)/t;

    if(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 >= BESSmax)
        BESS_E(i+1)= BESSkapacita*BESSmax/100;
        BESS(i+1) = BESSmax;
        BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
        P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

    elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 <= BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
        BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t);
        BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
        BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
        P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

    elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 > BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
        BESS_E(i+1) = BESS_E(i)+(BESSpow/t);
        BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
        BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
        P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

```

```

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 <= Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 > Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)+(Invertor_size/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 >= BESSmin) &&
(pomocna_2 <= BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 > BESSmin) &&
(pomocna_2 > BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)-(BESSpow/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 > BESSmin) &&
(pomocna_2 > Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)-(Invertor_size/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 >= BESSmin) &&
(pomocna_2 <= Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)<=BESSmin) && (BESS_help2 <= BESSmin)
    BESS_E(i+1)= BESSkapacita*BESSmin/100;
    BESS(i+1) = BESSmin;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

else
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i);
    BESS(i+1)= BESS(i);
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

end

end

if (i == hodnoty) && (max(P15optimal)>RK) && (pomer_inv_batt >= 1 ) ||
(isnan(pomer_inv_batt))
F=1;
i=0;

```

```

BESSkapacita= BESSkapacita+1;
BESSpow=Crate*BESSkapacita;
pomer_inv_batt = Invertor_size / BESSpow;
BESS_E = (BESS/100)*BESSkapacita;

for j = 1:hodnoty
    if(P15optimal(j)>RK)
        chyba_batt(j) = 1;
    else
        chyba_batt(j) = 0;
    end
end

l=l +1;
pocet_chyb_batt(l) = sum(chyba_batt);

elseif (i == hodnoty) && (max(P15optimal)>RK) && (pomer_inv_batt < 1 )
F=1;
i=0;

Invertor_size = Invertor_size+1;
BESSpow=Crate*BESSkapacita;
pomer_inv_batt = Invertor_size / BESSpow;
BESS_E = (BESS/100)*BESSkapacita;

for j = 1:hodnoty
    if(P15optimal(j)>RK)
        chyba_inv(j) = 1;
    else
        chyba_inv(j) = 0;
    end
end

k=k +1;
pocet_chyb_inv(k) = sum(chyba_inv);

elseif(i == hodnoty) && (max(P15optimal)<=RK) && ( o < 1)
F=1;
BESSkapacita= BESSkapacita * (1+(Batt_rezerva/100));
Invertor_size = Invertor_size * (1+(Inv_rezerva/100));
o = 1;

elseif(i == hodnoty) && (max(P15optimal)<=RK) && ( o == 1)
F=0;
BESSpow=Crate*BESSkapacita;
pomer_inv_batt = Invertor_size / BESSpow;
BESS_E = (BESS/100)*BESSkapacita;
end
end
end

% Manuálny návrh batériového úložiska %
if (Automaticky_vypocet == 0 )

for i = 1:hodnoty

    %pom3
    BESS_E_help1 = BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t;
    BESS_help1 = (BESS_E_help1/BESSkapacita)*100;
    pomocna_1 = (RK-P_data(i))/t;

```



```

%pom4
BESS_E_help2 = BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t;
BESS_help2 = (BESS_E_help2/BESSkapacita)*100 ;
pomocna_2 = abs(P_data(i)-RK)/t;

if(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 >= BESSmax)
    BESS_E(i+1)= BESSkapacita*BESSmax/100;
    BESS(i+1) = BESSmax;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 <= BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 > BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)+(BESSpow/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 <= Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)+(RK-P_data(i))/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) < RK ) && (BESS(i)<BESSmax) && (BESS_help1 < BESSmax) &&
(pomocna_1 > Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)+(Invertor_size/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 >= BESSmin) &&
(pomocna_2 <= BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 > BESSmin) &&
(pomocna_2 > BESSpow/t) && (pomer_inv_batt>=1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)-(BESSpow/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 > BESSmin) &&
(pomocna_2 > Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i)-(Invertor_size/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

```

```

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)>BESSmin) && (BESS_help2 >= BESSmin) &&
(pomocna_2 <= Invertor_size/t) && (pomer_inv_batt<1)
    BESS_E(i+1) = (BESS_E(i)-abs(P_data(i)-RK)/t);
    BESS(i+1) = (BESS_E(i+1)/BESSkapacita)*100 ;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

elseif(P_data(i) > RK) && (BESS(i)<=BESSmin) && (BESS_help2 <= BESSmin)
    BESS_E(i+1)= BESSkapacita*BESSmin/100;
    BESS(i+1) = BESSmin;
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

else
    BESS_E(i+1) = BESS_E(i);
    BESS(i+1)= BESS(i);
    BESS_Pdod(i) = (BESS_E(i+1)-BESS_E(i))*t;
    P15optimal(i) = P_data(i)+ BESS_Pdod(i);

end

end

% Vyhodnotenie manuálneho návrhu %
fail_batt = 0;
fail_inv = 0;

for i=1:1:hodnoty

    if (P15optimal(i)>RK ) && (pomer_inv_batt>1) && (BESS(i) > BESSmin)
        fail_batt = fail_batt + 1;

    elseif (P15optimal(i)>RK )&&(BESS(i) <= BESSmin)
        fail_batt = fail_batt + 1;

    elseif (P15optimal(i)>RK )&&(pomer_inv_batt<=1)&&(BESS(i) > BESSmin)
        fail_inv = fail_inv + 1;

    end

end

if(fail_batt>0)
    fail_batt_sign = 'nedostatočne dimenzovaná batéria';
end

if(fail_inv>0)
    fail_inv_sign = 'nedostatočne dimenzovaný invertor';
end

end

% Určenie oblasti vybíjania batérie %
oblast_vyb_batt = [0,0,0,0,0,0,0,0,0];

for i=1:hodnoty

    if (BESS(i)>= BESSmax )
        bess_pom_kap(i)= NaN;

    elseif (BESS(i) < BESSmax )

```

```

    bess_pom_kap(i) = BESS(i);

    end
end

for i = 1:hodnoty

    kapacita_vyuzita_krok(i) = (BESSmax*BESSkapacita/100) - BESS_E(i);

    if (bess_pom_kap(i) >= 80)&&(bess_pom_kap(i) < 100)
        oblast_vyb_batt(1,1) = oblast_vyb_batt(1,1)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 70)&&(bess_pom_kap(i) < 80)
        oblast_vyb_batt(1,2) = oblast_vyb_batt(1,2)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 60)&&(bess_pom_kap(i) < 70)
        oblast_vyb_batt(1,3) = oblast_vyb_batt(1,3)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 50)&&(bess_pom_kap(i) < 60)
        oblast_vyb_batt(1,4) = oblast_vyb_batt(1,4)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 40)&&(bess_pom_kap(i) < 50)
        oblast_vyb_batt(1,5) = oblast_vyb_batt(1,5)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 30)&&(bess_pom_kap(i) < 40)
        oblast_vyb_batt(1,6) = oblast_vyb_batt(1,6)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 20)&&(bess_pom_kap(i) < 30)
        oblast_vyb_batt(1,7) = oblast_vyb_batt(1,7)+1;
    elseif(bess_pom_kap(i) >= 0)&&(bess_pom_kap(i) < 20)
        oblast_vyb_batt(1,8) = oblast_vyb_batt(1,8)+1;

    end

end

figure(2);

bar(oblast_vyb_batt,0.5,'g'),title('Oblasť vybijania batériového systému ')
set(gca,'XTickLabel',{'90-80','80-70','70-60','60-50','50-40','40-30','30-20','20-10',})
labels = arrayfun(@(value)
num2str(value,'%2.2f'),oblast_vyb_batt,'UniformOutput',false);
text(1:8,oblast_vyb_batt,labels,'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignm
ent','bottom')
ylabel('počet vybití');
xlabel('DoD (%)');

kapacita_vyuzita = sum(kapacita_vyuzita_krok);
pocet_pl_cylov = round((kapacita_vyuzita)/(BESSkapacita));

if(pocet_pl_cylov>1)&&(pocet_pl_cylov*dobazivota<max_pocet_cyklov)

figure(4);

for x = 1:max_pocet_cyklov

    % y = -0.0894x3 +1.1761x2 -6.5346x + 100 vid' Obr. 6-5 (dokument)
    batt_ziv(x) = -0.0894*(x/1000)^3 + 1.1761*(x/1000)^2 - 6.5346*(x/1000)+100;

end

plot (batt_ziv),xlabel('počet plných cyklov'),ylabel('celková kapacita batérie
(%)'),title('Pribeh straty kapacity bat. v závislosti na počte cyklov; 1C,
20°C, (90 - 10)% SoC')
ylim ([60 120])

```

---

```

xlim ([0 6000])
hold on

if (data_mesiac>0)
x = pocet_pl_cylov*dobazivota*12;
elseif(data_rok>0)
x = pocet_pl_cylov*dobazivota;
end

y = (batt_ziv(x));
plot(x,batt_ziv(x),'r*')
line('XData', [x x 0], 'YData', [0 y y], 'LineWidth', 0.01, ...
     'LineStyle', '--')

strmax = [num2str(batt_ziv(x)), ' %'];
text(x,batt_ziv(x)+3,strmax,'VerticalAlignment','bottom',
     'HorizontalAlignment','left','fontSize',12);
end

if(pocet_chyb_inv>0)
figure(3);
bar (1:k, pocet_chyb_inv),xlabel('Výkon invertora (kW)'),ylabel('Počet
nevyhovení'),title('Chybová krivka invertora');
xlim ([0 k])
ylim ([0 max(pocet_chyb_inv)])
end

figure(5);

h(1)=subplot(2,1,1);
yyaxis left
p1=plot(time,P_data);xlabel('Čas (15min)'),ylabel('spotreba
(kW)'),title('diagram 15min maxím, SoC-batérie');
ylim([0 650])

hold on

yyaxis left
p1=plot([time(1) time(end)],[RK RK],'k--');
ylim ([0 650])

yyaxis right
plot(time,BESS(2:end)),ylabel('SoC (%)');
ylim([0 150])

legend([p1], 'RK', 'Location', 'northwest', 'Orientation', 'horizontal')

h(2)=subplot(2,1,2);
yyaxis left
plot(time,P_data),xlabel('Čas (15min)'),ylabel('spotreba
(kW)'),title('Optimalizácia spotreby pomocou BESS');
ylim([0 650])

hold on

yyaxis left
p2=plot([time(1) time(end)],[RK RK],'k--');
ylim([0 650])

```

```

yyaxis right
plot(time,P15optimal(1:end)),ylabel('optimalizovaná spotreba (kW)');
ylim([0 650])

legend([p2], 'RK', 'Location', 'northwest', 'Orientation', 'horizontal')

linkaxes(h, 'x')

%%%%% EKONOMIKA NÁVRHU %%%%%

% Úprava dát na 15min max. %
if(t>4)
t1 = t/4;
s=1;
r=1;
P_data_new= 0;

for i=1:1:numel(P_data)

    if (s<t1)
        P_data_new(r) = P_data_new(r)+ P_data(i);
        s=s+1;
    elseif (s==t1)
        P_data_new(r) = P_data_new(r)+ P_data(i);
        s=1;
        r=r+1;
        P_data_new(r)=0;
    end
end
P_data = P_data_new(1:1:numel(P_data_new)-1)/(t/4);
end

% Výpočet penalizácie za prekročenie RK - stávajúci stav %
for i=1:hodnoty

    if (P_data(i)>RK_skut )
        prekrocenie_skut(i)=P_data(i)-RK_skut;

    elseif (P_data(i)<=RK_skut)
        prekrocenie_skut(i)=0;

    end
end

if (data_mesiac>0)
platba_kap_poku = max(prekrocenie_skut)* RKcenaMW_rok/1000 * 4 * 12;
end

if (data_rok>0)
platba_poku_mesiac(1,1) = max(prekrocenie_skut(1:(1/12)*hodnoty))*
RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,2) =
max(prekrocenie_skut((1/12)*hodnoty:(2/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,3) =
max(prekrocenie_skut((2/12)*hodnoty:(3/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,4) =
max(prekrocenie_skut((3/12)*hodnoty:(4/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,5) =
max(prekrocenie_skut((4/12)*hodnoty:(5/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;

```

```

platba_poku_mesiac(1,6) =
max(prekrocenie_skut((5/12)*hodnoty:(6/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,7) =
max(prekrocenie_skut((6/12)*hodnoty:(7/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,8) =
max(prekrocenie_skut((7/12)*hodnoty:(8/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,9) =
max(prekrocenie_skut((8/12)*hodnoty:(9/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,10) =
max(prekrocenie_skut((9/12)*hodnoty:(10/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,11) =
max(prekrocenie_skut((10/12)*hodnoty:(11/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac(1,12) =
max(prekrocenie_skut((11/12)*hodnoty:(12/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;

platba_kap_poku = sum(platba_poku_mesiac);

end

if (data_rok>0)&&(platba_kap_poku>0)
figure(6)

bar(platba_poku_mesiac,0.4,'y')
title('Platba za prekročenie nazmluvnenej RK')
set(gca,'XTickLabel')
labels = arrayfun(@(value)
num2str(value,'%2.2f'),platba_poku_mesiac,'UniformOutput',false);
text(1:12,platba_poku_mesiac,labels,'HorizontalAlignment','center','VerticalAl
ignment','bottom')
ylabel('Kč');
xlabel('mesiac');
xlim([0 13])

end

% Výpočet penalizácie za prekročenie RK - navrhovaný stav%
for i=1:hodnoty

    if (P15optimal(i)>RK )
    prekrocenie_poop(i)=P15optimal(i)-RK;

    elseif (P15optimal(i)<=RK)
    prekrocenie_poop(i)=0;

    end
end

if (data_mesiac>0)
platba_kap_poku_poop = max(prekrocenie_poop)* RKcenaMW_rok/1000 * 4 * 12;
end

if (data_rok>0)
platba_poku_mesiac_poop(1,1) = max(prekrocenie_poop(1:(1/12)*hodnoty))*
RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,2) =
max(prekrocenie_poop((1/12)*hodnoty:(2/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,3) =
max(prekrocenie_poop((2/12)*hodnoty:(3/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,4) =
max(prekrocenie_poop((3/12)*hodnoty:(4/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;

```

```

platba_poku_mesiac_poop(1,5) =
max(prekrocenie_poop((4/12)*hodnoty:(5/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,6) =
max(prekrocenie_poop((5/12)*hodnoty:(6/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,7) =
max(prekrocenie_poop((6/12)*hodnoty:(7/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,8) =
max(prekrocenie_poop((7/12)*hodnoty:(8/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,9) =
max(prekrocenie_poop((8/12)*hodnoty:(9/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,10) =
max(prekrocenie_poop((9/12)*hodnoty:(10/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,11) =
max(prekrocenie_poop((10/12)*hodnoty:(11/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;
platba_poku_mesiac_poop(1,12) =
max(prekrocenie_poop((11/12)*hodnoty:(12/12)*hodnoty))* RKcenaMW_rok/1000 * 4;

platba_kap_poku_poop = sum(platba_poku_mesiac_poop);

end

% Náklad na rezervovanú kapacitu - stávajúci stav %
platba_kap_skut = (RK_skut_rok * RKcenaMW_rok * 12/1000)+(RK_skut_mes *
RKcenaMW_mes * 12/1000);
% Náklad na rezervovanú kapacitu a poplatok za prekročenie RK - stávajúci stav %
platba_celom_skut = platba_kap_skut + platba_kap_poku;

for i=1:hodnoty

    if (P_data(i)>P15optimal(i))
        dodana_en_plat(i)=(P_data(i)-P15optimal(i))/t;

    elseif (P_data(i)<=P15optimal(i))
        dodana_en_plat(i)=(P15optimal(i)-P_data(i))/t;

    end
end

dodana_en_platba = sum(dodana_en_plat)*(1-
(ucinnost_batt*ucinnost_str*ucinnost_str/1000000));
% Náklad na straty el. energie %
inv_straty_novy = round(dodana_en_platba * cena_silov_MWh / 1000);
% Celkový investičný náklad %
inv_naklad = invest_kWh_bat_ostatne*BESSkapacita +
invest_kWh_batt*BESSkapacita + Invertor_size*invest_kW_inver ;
% Úspora zmenou rezervovanej kapcity %
uspora_PS_RK = ((RK_skut_rok - RK_rok) * RKcenaMW_rok * 12/1000) +
((RK_skut_mes - RK_mes) * RKcenaMW_mes * 12/1000);

Cashflow = uspora_PS_RK + platba_kap_poku - inv_straty_novy -
platba_kap_poku_poop ;

navratnost_prosta = inv_naklad/Cashflow;

% NPV %
for i = 1:1:dobazivota

    zisk_diskont (i) = (Cashflow) / (1+(diskont/100))^(i);

```

```

end

NPV = sum(zisk_diskont) - inv_naklad;

zisk_diskont_cum = cumsum(zisk_diskont);

if (NPV < 0)
    navratnost_diskontovana = '-';
    NPV_pozn = 'projekt nie je vhodný na realizáciu' ;
end

if (NPV >= 0)
    NPV_pozn = 'projekt je vhodný na realizáciu' ;
end

for i = 1:1:dobazivota

    navratnost_diskontovana_graf (i) = ( - inv_naklad + zisk_diskont_cum(i))/1000;

    if (navratnost_diskontovana_graf (i)>=0) && (navratnost_diskontovana_graf (i-1)<0)
        navratnost_diskontovana = (i);

    end
end

figure(7);

for i = 1:1:dobazivota

    if (navratnost_diskontovana_graf (i) < 0)
        navratnost_diskontovana_graf_nad (i) = NaN;

    elseif (navratnost_diskontovana_graf (i) > 0)
        navratnost_diskontovana_graf_nad (i) = navratnost_diskontovana_graf (i);

    end
end

bar(navratnost_diskontovana_graf,0.4,'r')
hold on
bar(navratnost_diskontovana_graf_nad,0.4,'b')
title('Peňažné toky plynúce z realizácie investičného projektu')
set(gca,'XTickLabel')
labels = arrayfun(@(value)
    num2str(value,'%2.2f'),navratnost_diskontovana_graf,'UniformOutput',false);
text(1:dobazivota,navratnost_diskontovana_graf,labels,'HorizontalAlignment','center','VerticalAlignment','bottom')
ylabel('tis. Kč');
xlabel('rok');
xlim([0 dobazivota+1])
set(gca, 'XTick', 0:1:dobazivota+1);

% IRR %
diskont_irr=1;

for i = 1:1:dobazivota

    zisk_diskont_irr (i) = (Cashflow) / (1+(diskont_irr/100))^(i);

```



```
end

NPV_irr = sum(zisk_diskont_irr) - inv_naklad;

if(NPV_irr<0)
IRR = 'Realizačný projekt za dobu životnosti pri akomkoľvek diskonte
neposkytuje návratnosť počiatočnej investície ' ;
end

if(NPV==0) && (NPV_irr>0)
IRR = diskont;

elseif(NPV_irr>0)

p=0;
while(NPV_irr>0)

for i = 1:1:dobazivota

zisk_diskont_irr (i) = (Cashflow) / (1+(diskont_irr/100))^(i);

end

p=p+1;

diskont_irr=diskont_irr+1;

NPV_irr(p) = sum(zisk_diskont_irr) - inv_naklad;

end

IRR = ((p-(p-1))/(NPV_irr(p)-NPV_irr(p-1)))*(0-NPV_irr(p-1))+(p-1);

end
%% KONIEC %%
```